



**Universidade de
Aveiro
Ano 2013**

Departamento de Química de Aveiro

**Nuno Miguel da
Silva Costa**

**Efeito do pré-tratamento do alumínio na adesão do
revestimento de PTFE**



**Nuno Miguel da
Silva Costa**

**Efeito do pré-tratamento do alumínio na adesão do
revestimento de PTFE**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química, realizada sob a coorientação científica da Doutora Ana Margarida Madeira Viegas de Barros Timmons, Professor auxiliar do Departamento de Química da Universidade de Aveiro, e orientação na empresa pelo Eng.º Manuel Francisco da Silva Nunes, licenciado em Engenharia de Materiais pela Universidade de Coimbra.

o júri

presidente

Prof. Doutor Dmitry Victorovitch Evtyugin

Professor associado com agregação do Departamento de Química da Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Maria Elisabete Jorge Vieira da Costa

Professora auxiliar do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Ana Margarida Madeira Viegas de Barros Timmons

Professora auxiliar do Departamento de Química da Universidade de Aveiro

Eng.º. Manuel Francisco da Silva Nunes

Licenciado em Engenharia de Materiais pela Universidade de Coimbra

agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer ao meu orientador na empresa, Eng.º Manuel Francisco pelo apoio e disponibilidade sempre demonstrados, e por todos os conhecimentos que me transmitiu ao longo deste estágio. O saber e a experiência partilhada foram fundamentais para a realização desta dissertação e determinantes para o meu conhecimento profissional e pessoal.

Agradeço também ao administrador da empresa FLAMA S.A., Eng.º Luís Miguel Alves, por ter colocado ao meu dispor todos os recursos necessários para a elaboração desta tese e, acima de tudo, por me ter dado a oportunidade de poder colaborar com a empresa. Queria também expressar o meu muito obrigado a todos os elementos do departamento da qualidade, que sempre se mostraram prestáveis no sentido de me apoiar e ensinar a ser melhor no exercício das minhas funções.

Gostaria também de agradecer à minha coorientadora, a Professora Doutora Ana Margarida Madeira Viegas de Barros Timmons, por todo o apoio, incentivo e saber partilhado que foram essenciais para quebrar muitas das barreiras que me deparei ao longo desta dissertação. MUITÍSSIMO Obrigado!

Queria deixar uma palavra de profunda gratidão para os meus pais, irmã e namorada, pela ajuda, coragem e compreensão demonstradas ao longo de todo este percurso académico, sem o vosso apoio teria sido impossível realizar este sonho.

Finalmente, um agradecimento muito especial aos meus amigos e colegas de estudo, que me ajudaram a crescer como pessoa e que sempre me transmitiram total apoio e companheirismo ao longo desta caminhada.

O meu Muito Obrigado a todos!

palavras-chave

Fluoropolímeros; Alumínio; Desengorduramento; Decapagem; Adesão; FMEA.

resumo

Os fluoropolímeros são plásticos que se destacam pela sua elevada resistência térmica, química e mecânica, bem como pelas suas propriedades de antiaderência. Entre o vasto leque de aplicações que este tipo de polímeros possui, é na área dos revestimentos que se destacam. Por sua vez, o alumínio é um dos metais mais utilizados como suporte deste tipo de revestimentos, uma vez que é térmica e mecanicamente estável à temperatura de processamento dos fluoropolímeros. Apesar das suas excelentes propriedades, a superfície do alumínio é pouco rugosa e é constituída por uma camada de composição química heterogénea, o que impede que a interação substrato-revestimento possua a resistência e durabilidade desejada. Para combater estes dois fatores, na empresa FLAMA S.A. a superfície do alumínio é submetida a um processo de tratamento químico, que envolve um conjunto de operações onde se destacam o desengorduramento e a decapagem. Assim, o objetivo desta tese consistiu em identificar e compreender de que forma os tratamentos de superfície do alumínio influenciam o sistema substrato-revestimento.

Através da análise de modo de falha potencial (FMEA) identificou-se um conjunto de falhas do processo que necessitavam de atenção imediata, tendo-se avaliado as causas e consequências de cada uma na adesão, homogeneidade e durabilidade do revestimento de poli(tetrafluoretileno) (PTFE), em função das condições a que o metal era sujeito. Para tal, recorreu-se à avaliação da perda de massa das placas de alumínio, à análise da espessura e homogeneidade da película formada na superfície do metal, à medição de ângulos de contacto, ao teste da quadrícula, bem como ao controlo do pH das águas de lavagem.

A análise dos resultados obtidos e a correlação entre eles permitiram concluir que quanto menor é a concentração de desengordurante, menor é o ângulo de contacto formado entre a superfície do alumínio e a água e, por sua vez, menor é a interação revestimento-substrato. Esta análise juntamente com a ferramenta de qualidade FMEA permitiu ainda concluir que é totalmente indesejável trabalhar com concentrações de desengordurante inferiores a 18,3mL/L, uma vez que existe uma grande quantidade de resíduos que são arrastados para as fases posteriores do processo, levando à diminuição do tempo útil dos banhos de lavagem e decapagem. Relativamente aos banhos de decapagem, observou-se, através da avaliação da perda de massa, que quanto maior é a concentração de decapante, mais severo é o ataque ao metal por parte do ácido, traduzindo-se numa maior perda de alumínio. Finalmente no que diz respeito à espessura do revestimento, verificou-se que o impacto da concentração dos banhos é praticamente insignificante. Contudo, é essencial que em zonas específicas da placa de alumínio não exista qualquer tipo de pulverização manual da tinta, não só pelo facto desta situação levar a que a espessura do revestimento exceda o máximo admitido pelo fornecedor, mas para se evitar um consumo desnecessário de tinta.

keywords

Fluoropolymers; Aluminum; Degreasing; Etching; Adhesion; FMEA.

abstract

Fluoropolymers are plastics that stand out for their high heat, chemical and mechanical resistance, and also for their nonstick properties. This type of polymers has a lot of applications, but in the field of coatings is where they really stand out. In turn, aluminum is one of the most used metals as support for these coatings, because it's thermally and mechanically stable at the processing temperature of fluoropolymers. Although aluminum has excellent properties, the aluminum's surface is slightly rough and consists of a layer of heterogeneous chemical composition, which jeopardize the interaction substrate-coating and thus the strength and durability desired of the coated material. To overcome these two factors, at FLAMA SA the aluminum's surface is chemically treated by a process that involves a set of operations which include degreasing and etching. In this context the aim of this thesis was to identify and understand how the aluminum's surface treatment affect the substrate-coating system.

Using the failure mode and effects analysis (FMEA) analysis it was possible to identify a set of process failures that needed immediate attention. These was achieved by assessing the effect of each surface treatment conditions on the adhesion of poly(tetrafluorethylene) (PTFE), durability and homogeneity of the coat. The procedures used to monitor such effects included measuring the aluminum plates weight loss, film thickness, contact angle and the pH of the rinsing water. The homogeneity of the films was assessed by eye and adhesion of PTFE to the aluminum surface was monitored using the cross-cut test.

Based on the analysis of the results obtained and the correlation between them it was concluded that the lower the degreasing concentration, the lower the contact angle formed between the aluminum's surface and the water is. Hence, the lower is the coating-substrate interaction. This analysis together with the quality tool FMEA also allowed to conclude the use of degreasing with concentrations lower than 18,3mL/L must be avoided due to the large amount of waste that is dragged to the later stages of the process reducing the lifetime of the rinsing and etching baths. As regards the etching baths, measuring of the loss weight of the aluminium plates as a function of concentration showed that the higher etching concentration, the stronger is the acid attack on the metal.

Finally, in what concerns the coating thickness it was found that the effect of the baths concentration is practically negligible. Moreover, defect zones should not be disguised by manual paint spraying as this leads to coating thickness values beyond the limits recommended by the manufacturer and are associated with unnecessary paint consumption.



ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	1
1.2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. MECANISMOS PROTETORES EM SUPERFÍCIES METÁLICAS	3
2.1.1. Camadas protetoras de formação natural	3
2.1.2. Camadas protetoras de formação artificial (revestimentos).....	3
2.2. FLUOROPOLÍMEROS	6
2.2.1. Politetrafluoretileno – PTFE	6
2.2.2. Alternativas ao PTFE	7
2.2.3. Seleção de um revestimento fluorado	8
2.2.4. Alternativas aos revestimentos fluorados	9
2.3. ALUMÍNIO COMO SUPORTE AO PTFE	11
2.3.1. Química da Superfície – Adesão ao alumínio.....	11
2.3.2. Tratamentos Químicos e Físico-Químicos.....	13
2.4. APLICAÇÃO E PROCESSAMENTO DE UM REVESTIMENTO DE PTFE	16
2.4.1. Composição de um revestimento antiaderente.....	16
2.4.2. Métodos de aplicação de revestimentos líquidos	17
2.4.3. Processamento de revestimentos fluorados	19
2.5. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MORFOLÓGICA.....	20
2.5.1. Adesão	20
2.5.2. Ângulo de contacto	21
2.6. ANÁLISE DE MODO E EFEITOS DE FALHA POTENCIAL – FMEA.....	22
2.6.1. Tipos de FMEA	23
2.6.2. Funcionamento básico da FMEA.....	23
3. METODOLOGIA	29
3.1. PLACAS DE ALUMÍNIO ESTAMPADAS	29
3.2. PROCESSO DE TRATAMENTO DAS PLACAS DE ALUMÍNIO	29
3.3. PROCESSO DE APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO ANTIADERENTE.....	31
3.4. MÉTODO DE CONTROLO ANALÍTICO DOS BANHOS DE DESENGORDURAMENTO.....	32
3.5. MÉTODO DE CONTROLO ANALÍTICO DOS BANHOS DE DECAPAGEM	33
3.6. EFICIÊNCIA DA LAVAGEM EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE E DECAPANTE	34
3.7. MEDIÇÃO/MONITORIZAÇÃO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO.....	35
3.8. CONTROLO DAS ÁGUAS DE LAVAGEM	36



3.9.	TESTE DA QUADRÍCULA.....	36
3.10.	MEDIÇÕES DE ÂNGULOS DE CONTACTO.....	37
4.	DISCUSSÃO E RESULTADOS	39
4.1.	EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE E DECAPANTE NO GRAU DE LAVAGEM.....	39
4.2.	EVOLUÇÃO DO PH DAS ÁGUAS DE LAVAGEM.....	47
4.3.	EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE E DECAPANTE NA ESPESSURA DO REVESTIMENTO.....	48
4.4.	DISTRIBUIÇÃO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO NAS PLACAS DE ALUMÍNIO	51
4.5.	TESTES DA QUADRÍCULA.....	54
4.6.	ÂNGULOS DE CONTACTO	58
4.7.	ANÁLISE FMEA	60
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	63
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXO A		74
ANEXO B		77
ANEXO C		78
ANEXO D		79
ANEXO E		82
ANEXO F		83
ANEXO G		94



Lista de Figuras

FIG. 2.5.1 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO EQUILÍBRIO DAS TENSÕES SUPERFICIAIS ENTRE SÓLIDO, LÍQUIDO E VAPOR, FORMANDO O ÂNGULO DE CONTACTO Θ ^[42]	21
FIG. 2.6.1 – FLUXOGRAMA UTILIZADO NO PREENCHIMENTO DO FORMULÁRIO FMEA ^[47]	25
FIG. 3.2.1 - REPRESENTAÇÃO SEQUENCIAL DAS VÁRIAS FASES DO PROCESSO DE TRATAMENTO DA SUPERFÍCIE DAS PLACAS ALUMÍNIO, NA EMPRESA FLAMA S.A.	30
FIG. 3.3.1 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS VÁRIAS ETAPAS DO PROCESSO DE PINTURA DE ANTIADERENTES DA EMPRESA FLAMA S.A.....	31
FIG. 3.7.1 – EXEMPLO DE UMA PLACA UTILIZADA NOS VÁRIOS ENSAIOS, ONDE SÃO IDENTIFICADAS AS DIFERENTES ZONAS QUE FORAM SUBMETIDAS AO CONTROLO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO....	35
FIG. 3.10.1 – A) MEDIDOR DE ÂNGULOS DE CONTACTO DATAPHYSICS OCA 20, UTILIZADO NESTE ESTUDO; B) IMAGEM DA GOTA FORNECIDA ATRAVÉS DO SISTEMA DE VÍDEO COMBINADO COM O COMPUTADOR.....	37
FIG. 4.1.3 – EVOLUÇÃO DO GRAU DE LAVAGEM EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE: A) MÍNIMA E B) MÁXIMA, PARA OS CASOS EM QUE SE ALTEROU AS DUAS DECAPAGENS SIMULTANEAMENTE. AS BARRAS DE ERRO APRESENTADAS CORRESPONDEM AOS DESVIOS PADRÃO OBTIDOS NO CÁLCULO DO GRAU DE LAVAGEM, EM CADA ENSAIO.....	42
FIG. 4.1.4 – EVOLUÇÃO DO GRAU DE LAVAGEM EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE: A) MÍNIMA E B) MÁXIMA, PARA OS CASOS EM QUE SE FIXOU A CONCENTRAÇÃO DO PRIMEIRO TANQUE DE DECAPAGEM NO VALOR MÍNIMO (2,5%), VARIANDO A CONCENTRAÇÃO DO SEGUNDO TANQUE DE DECAPAGEM. AS BARRAS DE ERRO APRESENTADAS CORRESPONDEM AOS DESVIOS PADRÃO OBTIDOS NO CÁLCULO DO GRAU DE LAVAGEM, EM CADA ENSAIO.....	43
FIG. 4.1.5 – EVOLUÇÃO DO GRAU DE LAVAGEM EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE: A) MÍNIMA E B) MÁXIMA, PARA OS CASOS EM QUE SE FIXOU A CONCENTRAÇÃO DO SEGUNDO TANQUE DE DECAPAGEM (2,5%), VARIANDO A CONCENTRAÇÃO DO PRIMEIRO TANQUE DE DECAPAGEM. AS BARRAS DE ERRO APRESENTADAS CORRESPONDEM AOS DESVIOS PADRÃO OBTIDOS NO CÁLCULO DO GRAU DE LAVAGEM, EM CADA ENSAIO.	44
FIG. 4.1.6 – EVOLUÇÃO DO GRAU DE LAVAGEM EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE: A) MÍNIMA E B) MÁXIMA, PARA OS CASOS EM QUE SE FIXOU A CONCENTRAÇÃO DO PRIMEIRO TANQUE DE DECAPAGEM NO VALOR INTERMÉDIO (3,5%), VARIANDO A CONCENTRAÇÃO DO SEGUNDO TANQUE DE DECAPAGEM.. AS BARRAS DE ERRO APRESENTADAS CORRESPONDEM AOS DESVIOS PADRÃO OBTIDOS NO CÁLCULO DO GRAU DE LAVAGEM, EM CADA ENSAIO.....	45
FIG. 4.1.7 – EVOLUÇÃO DO GRAU DE LAVAGEM EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE: A) MÍNIMA E B) MÁXIMA, PARA OS CASOS EM QUE SE FIXOU A CONCENTRAÇÃO DO SEGUNDO TANQUE DE DECAPAGEM NO VALOR INTERMÉDIO (3,5%), VARIANDO A CONCENTRAÇÃO DO PRIMEIRO TANQUE DE DECAPAGEM. AS BARRAS DE ERRO APRESENTADAS CORRESPONDEM AOS DESVIOS PADRÃO OBTIDOS NO CÁLCULO DO GRAU DE LAVAGEM, EM CADA ENSAIO.....	45
FIG. 4.1.8 – EVOLUÇÃO DO GRAU DE LAVAGEM EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE: A) MÍNIMA E B) MÁXIMA, PARA OS CASOS EM QUE SE FIXOU A CONCENTRAÇÃO	



DO PRIMEIRO TANQUE DE DECAPAGEM NO VALOR MÁXIMO (5,0%), VARIANDO A CONCENTRAÇÃO DO SEGUNDO TANQUE DE DECAPAGEM. AS BARRAS DE ERRO APRESENTADAS CORRESPONDEM AOS DESVIOS PADRÃO OBTIDOS NO CÁLCULO DO GRAU DE LAVAGEM, EM CADA ENSAIO.	46
FIG. 4.1.9 – EVOLUÇÃO DO GRAU DE LAVAGEM EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE: A) MÍNIMA E B) MÁXIMA, PARA OS CASOS EM QUE SE FIXOU A CONCENTRAÇÃO DO SEGUNDO TANQUE DE DECAPAGEM NO VALOR MÁXIMO (5,0%), VARIANDO A CONCENTRAÇÃO DO PRIMEIRO TANQUE DE DECAPAGEM. AS BARRAS DE ERRO APRESENTADAS CORRESPONDEM AOS DESVIOS PADRÃO OBTIDOS NO CÁLCULO DO GRAU DE LAVAGEM, EM CADA ENSAIO.	46
FIG. 4.2.1 – EVOLUÇÃO DO PH AO LONGO DO TEMPO, NOS QUATRO TANQUES DO PROCESSO DE TRATAMENTO DAS PLACAS DE ALUMÍNIO DA EMPRESA.	47
FIG. 4.3.1 – VARIAÇÃO DA ESPESSURA PARA OS ENSAIOS REALIZADOS SOB AS CONDIÇÕES REFERIDAS NA SECÇÃO ANTERIOR DESTE CAPÍTULO, ISTO É, QUANDO O SISTEMA APRESENTAVA GRANDE INSTABILIDADE. AS BARRAS DE ERRO APRESENTADAS CORRESPONDEM AOS DESVIOS PADRÃO OBTIDOS NA MEDIÇÃO DAS ESPESSURAS, OBTIDAS PELO ELCOMETER.	49
FIG. 4.3.2 – EVOLUÇÃO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE: A) MÍNIMA E B) MÁXIMA, PARA OS CASOS EM QUE SE ALTEROU AS DUAS DECAPAGENS SIMULTANEAMENTE. AS BARRAS DE ERRO APRESENTADAS CORRESPONDEM AOS DESVIOS PADRÃO OBTIDOS NA MEDIÇÃO DAS ESPESSURAS, OBTIDAS PELO ELCOMETER.	50
FIG. 4.4.1 – VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO PARA AS DIFERENTES ZONAS DA PLACA, OBTIDO POR DIFERENTES FORMAS DE PINTURA E, CONSEQUENTE COMPARAÇÃO COM A ESPESSURA DE UM REVESTIMENTO EM QUE O SUBSTRATO NÃO SOFREU QUALQUER TIPO DE TRATAMENTO PRÉVIO.	52
FIG. 4.4.2 – VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO PARA AS DIFERENTES ZONAS DA PLACA, OBTIDO POR DIFERENTES FORMAS DE PINTURA E, EM FUNÇÃO DO AUMENTO DA DIFERENÇA DE POTENCIAL.	53
FIG. 4.5.1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO TESTE DA QUADRÍCULA PARA OS ENSAIOS REALIZADOS SOB CONDIÇÕES DE INSTABILIDADE, OU SEJA, A CONCENTRAÇÕES DE DESENGORDURANTE INFERIORES A 18,29ML/L.	54
FIG. 4.5.2 - RESULTADOS DO TESTE DA QUADRÍCULA PARA OS ENSAIOS EM QUE SE OBTVEU UM ÍNDICE DE GRAU DE ADESÃO DIFERENTE DE ZERO, REPRESENTADO PARA AS DIFERENTES FORMAS DE APLICAÇÃO DA TINTA.	56
FIG. 4.5.3 - RESULTADOS OBTIDOS PELO TESTE DA QUADRÍCULA, PARA OS ENSAIOS REALIZADOS UTILIZANDO UMA DIFERENÇA DE POTENCIAL ELEVADA.	57
FIG. 4.6.1 - EVOLUÇÃO DO ÂNGULO DE CONTACTO FORMADO ENTRE AS SUPERFÍCIE DE ALUMÍNIO E A ÁGUA, PARA OS CASOS EM QUE O SISTEMA APRESENTAVA GRANDE INSTABILIDADE (AZUL), OU QUANDO O RESULTADO DOS TESTES DA QUADRÍCULA FORAM NEGATIVOS (VERMELHO).	58
FIG. 4.6.2 – EVOLUÇÃO DO ÂNGULO DE CONTACTO FORMADO ENTRE AS SUPERFÍCIE DE ALUMÍNIO E A ÁGUA, PARA OS CASOS ONDE SE OBSERVOU UMA DIFERENÇA ACENTUADA DA PERDA DE MASSA EM RELAÇÃO AOS RESTANTES CASOS (VERMELHO E VERDE) E, QUANDO A PLACA NÃO FOI SUJEITA A QUALQUER TIPO DE TRATAMENTO (AZUL).	59



FIG. D1 – EVOLUÇÃO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE: A) MÍNIMA E B) MÁXIMA, PARA OS CASOS EM QUE SE FIXOU A PRIMEIRA DECAPAGEM NO VALOR MÍNIMO (2,5%), VARIANDO A SEGUNDA DECAPAGEM. AS BARRAS DE ERRO APRESENTADAS CORRESPONDEM AOS DESVIOS PADRÃO OBTIDOS NA MEDIÇÃO DAS ESPESSURAS, OBTIDAS PELO ELCOMETER.	79
FIG. D2– EVOLUÇÃO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE: A) MÍNIMA E B) MÁXIMA, PARA OS CASOS EM QUE SE FIXOU A SEGUNDA DECAPAGEM NO VALOR MÍNIMO (2,5%), VARIANDO A PRIMEIRA DECAPAGEM. AS BARRAS DE ERRO APRESENTADAS CORRESPONDEM AOS DESVIOS PADRÃO OBTIDOS NA MEDIÇÃO DAS ESPESSURAS, OBTIDAS PELO ELCOMETER.	79
FIG. D3 – EVOLUÇÃO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE: A) MÍNIMA E B) MÁXIMA, PARA OS CASOS EM QUE SE FIXOU A PRIMEIRA DECAPAGEM NO VALOR INTERMÉDIO (3,5%), VARIANDO A SEGUNDA DECAPAGEM. AS BARRAS DE ERRO APRESENTADAS CORRESPONDEM AOS DESVIOS PADRÃO OBTIDOS NA MEDIÇÃO DAS ESPESSURAS, OBTIDAS PELO ELCOMETER.	80
FIG. D4 – EVOLUÇÃO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE: A) MÍNIMA E B) MÁXIMA, PARA OS CASOS EM QUE SE FIXOU A SEGUNDA DECAPAGEM NO VALOR INTERMÉDIO (3,5%), VARIANDO A PRIMEIRA DECAPAGEM. AS BARRAS DE ERRO APRESENTADAS CORRESPONDEM AOS DESVIOS PADRÃO OBTIDOS NA MEDIÇÃO DAS ESPESSURAS, OBTIDAS PELO ELCOMETER.	80
FIG. D5 – EVOLUÇÃO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE: A) MÍNIMA E B) MÁXIMA, PARA OS CASOS EM QUE SE FIXOU A PRIMEIRA DECAPAGEM NO VALOR MÁXIMO (5,0%), VARIANDO A SEGUNDA DECAPAGEM. AS BARRAS DE ERRO APRESENTADAS CORRESPONDEM AOS DESVIOS PADRÃO OBTIDOS NA MEDIÇÃO DAS ESPESSURAS, OBTIDAS PELO ELCOMETER.	81
FIG. D6 – EVOLUÇÃO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE: A) MÍNIMA E B) MÁXIMA, PARA OS CASOS EM QUE SE FIXOU A SEGUNDA DECAPAGEM NO VALOR MÁXIMO (5,0%), VARIANDO A PRIMEIRA DECAPAGEM. AS BARRAS DE ERRO APRESENTADAS CORRESPONDEM AOS DESVIOS PADRÃO OBTIDOS NA MEDIÇÃO DAS ESPESSURAS, OBTIDAS PELO ELCOMETER.	81



Lista de Tabelas

TABELA 3.2.1 – COMPONENTES E CONDIÇÕES UTILIZADOS EM CADA FASE DO PROCESSO DE LAVAGEM DAS PLACAS DE ALUMÍNIO.	30
TABELA 3.3.1 – FASES DO PROCESSO DE PINTURA DE ANTIADERENTES E CONDIÇÕES UTILIZADAS. .	31
TABELA 3.6.1 – DIFERENTES COMBINAÇÕES DE CONCENTRAÇÕES DE DESENGORDURANTE E DECAPANTE UTILIZADAS NOS VÁRIOS ENSAIOS REALIZADOS.....	34
TABELA 3.9.1 – CLASSIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DO TESTE DA QUADRÍCULA.....	36
TABELA A.1 – EXEMPLO DA TABELA COM O FORMULÁRIO FMEA DE PROCESSO UTILIZADO PELA EMPRESA NA ANÁLISE DE TODOS OS SEUS PRODUTOS/PROCESSOS.	74
TABELA A.2 – EXEMPLO DE UMA TABELA COM OS VÁRIOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA GRAVIDADE DE UM MODO DE FALHA PARA O FMEA DE PROCESSO ^[53]	75
TABELA A.3 – TABELA COM OS VÁRIOS CRITÉRIOS UTILIZADOS PARA AVALIAR A OCORRÊNCIA DE DETERMINADO MODO DE FALHA, PARA O FMEA DE PROCESSO ^[52]	75
TABELA A.4 – TABELA COM OS VÁRIOS CRITÉRIOS UTILIZADOS PARA AVALIAR A DETECÇÃO DE DETERMINADO MODO DE FALHA, PARA O FMEA DE PROCESSO ^[50]	76
TABELA B.1 – TABELA COM OS TEMPOS ENVOLVIDOS NAS VÁRIAS ETAPAS DO TRATAMENTO DA SUPERFÍCIE DE PLACAS DE ALUMÍNIO DA EMPRESA FLAMA S.A.	77
TABELA E1 – RESULTADOS OBTIDOS PELO TESTE DA QUADRÍCULA, PARA AS PLACAS DE ALUMÍNIO QUE NÃO FORAM SUBMETIDAS A QUALQUER TIPO DE TRATAMENTO PRÉVIO.....	82
TABELA E2 – CONCENTRAÇÕES DE DESENGORDURANTE (NOVASPRAY AL 1) E DECAPANTE (N-KLEEN ETCH), UTILIZADAS NOS VÁRIOS ENSAIOS REALIZADOS.	82
TABELA G1 – FORMULÁRIO FMEA UTILIZADO NA ANÁLISE DO PROCESSO DE TRATAMENTO DAS PLACAS DE ALUMÍNIO UTILIZADAS COMO SUPORTE AO GREBLON.....	83
TABELA G2 – FORMULÁRIO FMEA UTILIZADO NA ANÁLISE DO PROCESSO APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO DE GREBLON SOBRE A SUPERFÍCIE DE ALUMÍNIO.....	90



Lista de Abreviaturas

θ	Ângulo de contacto	° - Graus centígrados
Al_2O_3	Óxido de alumínio	
Cr_2O_3	Óxido de Crómio	
<i>Dec.</i>	Decapagem	
<i>Deseng.</i>	Desengorduramento	
<i>DMF</i>	Dimetilformamida	
<i>EPA</i>	Agência de proteção ambiental	
<i>Eq.</i>	Equação	
<i>ETFE</i>	Copolímero de etileno-tetrafluoroetileno	
<i>FEP</i>	Copolímero de Etileno-Propileno Fluorado	
<i>Ferv.</i>	Fervura	
<i>FLAMA S.A.</i>	Fábrica de louças e Eletrodomésticos, Sociedade Anónima	
<i>FMEA</i>	Análise de Modo e Efeito de Falha	
<i>FMECA</i>	Análise de Modo, Efeito e Criticidade de Falha	
<i>FT</i>	Ficha técnica	
<i>HFP</i>	Hexafluorpropileno	
<i>HVLP</i>	“ <i>High-Volume, Low-Pressure</i> ”	
<i>IF</i>	Instrução funcional	
<i>KOH</i>	Hidróxido de potássio	
<i>Lav.</i>	Lavagem	
<i>NaOH</i>	Hidróxido de sódio	
<i>NMP</i>	N-metil-2-pirrolidona	
<i>PAI</i>	Poliamida-imida	
<i>PES</i>	Poli(éter sulfona)	
<i>PFA</i>	Perfluoroalcóxido	
<i>PFOA</i>	Ácido perfluorooctanóico	
<i>Pint.</i>	Pintura	
<i>PPVE</i>	Éter perfluoropropil-vinílico	
<i>PTFE</i>	Poli(tetrafluoretileno)	
<i>PVDF</i>	Fluoreto de polivinilideno	
<i>RPN</i>	Número de Risco de Prioridade	
<i>ST</i>	Sem tratamento	
<i>TFE</i>	Tetrafluoroetileno	
<i>VNV</i>	Veículo fixo ou não-volátil	





1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

A FLAMA S.A., empresa onde foi realizada esta tese, está sediada na zona industrial de Cesar, Oliveira de Azeméis, e emprega cerca de 200 pessoas numa área total de 12.000 m². Trata-se de uma empresa com mais de 30 anos de experiência, fundada com o objetivo inicial de fabricar apenas loiças metálicas em alumínio.

Nesta empresa são prestados diversos tipos de serviços, nomeadamente ao nível da Engenharia, Produção, Logística, Design, entre outros, que conferem uma grande variedade de capacidades industriais, como sejam a injeção de termoplásticos (Formaplás – Grupo FLAMA S.A.), pintura de antiaderentes, estampagem, etc. Esta aposta na qualidade e inovação faz com que a FLAMA apresente elevados padrões de qualidade, investindo na pesquisa e desenvolvimento de novos produtos. Deste modo, hoje a sua atividade reside não só na produção e comercialização de louças metálicas, mas também de pequenos eletrodomésticos com a marca FLAMA ou para reconhecidas marcas internacionais, como são exemplo as prestigiadas empresas Philips, Rowenta, Tefal, Cafés Delta, entre outras. Dentro desses pequenos eletrodomésticos destacam-se os grelhadores e máquinas de café, bem como as torradeiras e os ferros de engomar, sendo que todos apresentam um design moderno, qualidade e, acima de tudo, adequados às necessidades do consumidor. Para tal, a empresa procura sempre aliar o seu crescimento económico à satisfação de todos os seus parceiros (colaboradores, consumidores, fornecedores), apostando na melhoria contínua dos sistemas e práticas e utilizando os mais recentes equipamentos e tecnologias para estar na vanguarda das tendências do mercado. A inovação, o rigor na execução, a busca permanente da excelência e o foco nos resultados estão na base da estratégia e visão da empresa, que lhe permitiram crescer e ocupar um lugar de destaque na Indústria, não só em Portugal, mas também no mercado espanhol, onde os consumidores consideram já a Flama uma marca de referência.

1.2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

A escolha do tema desta dissertação teve como principal razão a necessidade da empresa FLAMA S.A. otimizar todo o processo de pintura de antiaderentes, isto é, desde o pré-tratamento de placas de alumínio, passando pela fase de aplicação e processamento do revestimento de Greblon sobre essas superfícies, até à obtenção do produto final (substrato de alumínio revestido com uma película perfeitamente homogénea de Greblon). Surgiu ainda a necessidade de atualizar ou implementar novos procedimentos que garantissem um perfeito contacto entre os componentes deste sistema (substrato-revestimento) e detetassem precocemente qualquer tipo de falha no sistema.

Através da ferramenta de qualidade FMEA, realizada com o engenheiro de projeto, a diretora da qualidade e alguns elementos da empresa, identificou-se um conjunto de falhas dos



dois processos em questão, tendo-se verificado que o processo de pré-tratamento das placas de alumínio era o que necessitava de atenção imediata, não só porque existia um gasto descontrolado de produto nos banhos inerentes, mas sobretudo porque não existia qualquer controlo da concentração destes banhos.

Assim, o principal objetivo desta dissertação consistiu em identificar e compreender de que forma a química da superfície do alumínio influencia o sistema substrato-revestimento, e adotar mecanismos e métodos que previnam eficientemente qualquer falha neste sistema.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos que expõem os aspetos essenciais de cada um deles e a sequência dos estudos efetuados. No presente capítulo apresenta-se a empresa onde foi realizada esta dissertação, fazendo-se uma breve introdução ao tema em estudo, onde são descritos de forma sucinta os principais objetivos deste trabalho. No segundo capítulo são apresentados e estudados os conceitos teóricos mais relevantes para a realização desta tese, nomeadamente: os principais tipos de revestimento existentes, a classe de polímeros a que pertence este tipo de revestimento, o substrato alumínio como suporte ao tipo de revestimento em questão, os principais métodos de aplicação e processamento deste tipo de revestimento, os principais métodos de caracterização física e morfológica deste sistema e, finalmente, os princípios básicos e funcionamento da ferramenta de gestão da qualidade FMEA.

No capítulo seguinte, metodologia, é feita uma descrição de todos os procedimentos e testes realizados, identificando-se todos os parâmetros e condições inerentes aos dois principais processos em análise: pré-tratamento do substrato alumínio, e aplicação e processamento de um revestimento de Greblon depositado sobre essa mesma superfície. No capítulo quatro descrevem-se e analisam-se detalhadamente todos os casos de estudo, apresentando-se graficamente os principais resultados, nomeadamente: a variação da perda de massa com a concentração de desengordurante e de decapante, a evolução do pH das águas de lavagem, a variação da espessura do revestimento de Greblon com a concentração do tanque de desengorduramento e de decapagem, a distribuição dessa mesma espessura ao longo de uma placa de alumínio, os resultados do teste da quadrícula para os principais ensaios realizados, os ângulos de contacto para as placas que sofreram diferentes tipos de tratamento e, finalmente, as principais conclusões que se podem tirar através da ferramenta de gestão da qualidade FMEA.

Finalmente, no quinto capítulo apresentam-se as principais conclusões do trabalho realizado, enunciando-se também algumas das principais condicionantes que estiveram na base de alguns erros obtidos. Deixa-se ainda como sugestão, alguns trabalhos ou testes que seriam importantes realizar de forma a otimizar outras variáveis do processo em questão, ou prevenir alguns dos problemas identificados que não foram alvo de qualquer ação.



2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MECANISMOS PROTETORES EM SUPERFÍCIES METÁLICAS

Os metais, na sua generalidade, apresentam uma condição termodinâmica instável e, através da formação de óxidos, hidróxidos, sais, entre outros, tendem a alterá-la para uma condição estável. Trata-se de um processo espontâneo que representa uma das principais causas de corrosão conhecidas e, não fosse o emprego de mecanismos protetores, ocorreria a destruição completa do metal. Sendo assim, para atenuar esta tendência natural e indesejável, existem vários métodos de controlo da corrosão, sendo que a maioria deles consiste em intercalar uma camada protetora entre o metal e o meio corrosivo. Essas camadas protetoras podem ser de formação natural (películas que se formam diretamente na superfície, como resultado das transformações químicas que ocorrem em ambientes convencionais), ou artificial (no caso do emprego de revestimentos) ^[1,2].

2.1.1. Camadas protetoras de formação natural

A formação natural das camadas protetoras está relacionada com os efeitos benéficos que a corrosão pode apresentar em determinadas circunstâncias. A corrosão, apesar do impacto negativo que causa em alguns metais, apresenta, sob determinado ponto de vista, um lado positivo. Existem alguns casos de elevada importância industrial, como é exemplo a oxidação de aços inoxidáveis, em que ocorre a formação de uma película de óxido de cromo (Cr_2O_3) na superfície do metal com características protetoras. Outro exemplo, diz respeito à oxidação do alumínio que confere, além de características protetoras, bom aspeto decorativo ao alumínio, alta resistividade elétrica e elevada aderência através da formação de uma película de óxido de alumínio (Al_2O_3) na superfície do mesmo ^[1,3].

2.1.2. Camadas protetoras de formação artificial (revestimentos)

Os revestimentos são películas que, ao serem aplicadas sobre uma superfície metálica, dificultam o contacto entre esta e o meio corrosivo, minimizando assim a degradação da superfície pela ação desse meio. O tempo de proteção dado por um revestimento depende da sua natureza química, das forças de coesão e adesão, da sua espessura e da sua permeabilidade ^[1].

São inúmeras as tecnologias existentes que possibilitam o emprego de revestimentos em superfícies constituídas pelos mais variadíssimos materiais, com diversas formas e dimensões, pelo que existem imensas possibilidades de se produzirem revestimentos com um objetivo específico, que podem ser classificados consoante a finalidade a que se destinam ^[1]. Entre as tecnologias mais tradicionais de revestimento temos os revestimentos metálicos, os não-metálicos inorgânicos e os não-metálicos orgânicos (que serão abordados detalhadamente neste



capítulo). O primeiro caso diz respeito à interposição de uma película metálica entre o metal que se quer proteger e o meio corrosivo. As técnicas mais comuns de aplicação deste tipo de revestimentos são: a cladização (“*Cladding*”), a imersão, a aspersão e a eletrodeposição ^[1-4]. De entre os revestimentos inorgânicos não-metálicos salientam-se os vidros, as cerâmicas, esmaltes vítreos, os nitretos, os carbetos, entre outros ^[1,2,5-9].

2.1.2.1. Revestimentos não-metálicos orgânicos

Neste tipo de revestimento, a película que separa o metal do meio corrosivo é de natureza orgânica e/ou polimérica. A aplicação de tintas como forma de proteção da corrosão é uma técnica muito usada e uma das mais importantes na indústria de revestimentos. Isto deve-se principalmente a fatores como a facilidade de aplicação e manutenção, a relação custo-benefício ou ainda, por possuir uma série de propriedades paralelas importantes, nomeadamente no que diz respeito à excelente adesividade a superfícies e ao facto de possuir características de impermeabilização. Integram-se ainda dentro deste grupo os revestimentos plásticos (termoplásticos e termoendurecíveis) ou as bandas adesivas, que possuem entre outras características, excelentes propriedades de resistência química, dureza e flexibilidade ^[1-3].

As tintas são composições pigmentadas líquidas, em pó ou pastosas que, ao serem aplicadas sobre superfícies apropriadas, no estado em que são fornecidas ou após diluição, ou dispersão em produtos voláteis, formam uma película sólida, opaca e colorida. As tintas líquidas são constituídas por pigmentos, aditivos, veículos voláteis (solventes e diluentes) e não-voláteis ou fixos. As tintas em pó e os vernizes diferem das líquidas simplesmente no que diz respeito à ausência de um solvente e à carência de pigmentos, respetivamente ^[1,4].

O veículo fixo ou não-volátil (VNV), constituído por um ou mais tipos de resinas, é um dos principais responsáveis pela película de tinta que se forma sobre a superfície metálica. Como consequência, a maioria das propriedades finais dessa película dependem dos tipos de resina utilizados. Dentro deste tipo de constituinte existem ainda os VNV conversíveis – no momento da formação da película, são observadas transformações físico-químicas na composição do VNV, devido a, simultaneamente ou previamente à evaporação do solvente, ocorrer a polimerização desses mesmos veículos; VNV não-conversíveis – não ocorre nenhuma alteração na composição do veículo, uma vez que a película se forma apenas pela evaporação do solvente ^[1,10].

A natureza do veículo fixo assume um papel muito importante nas características dos revestimentos por pintura, de tal forma que confere a designação aos vários sistemas de pintura, como por exemplo, o sistema oleoso, alquídico, vinílico, entre outros. Dependendo da composição do sistema de pintura (tintas que têm o mesmo veículo fixo) a conversão do filme



húmido de tinta num filme sólido pode ser obtida de diversas formas, entre as quais se destacam a evaporação de solventes, a oxidação, a polimerização à temperatura ambiente e a coalescência. O mecanismo do primeiro caso caracteriza-se essencialmente pela simples evaporação dos solventes do sistema, que é aplicada sobre a superfície, formando uma película muito fina, adesiva e coesa. Os veículos fixos utilizados neste mecanismo são essencialmente não-conversíveis (resinas vinílicas, acrílicas ou borrachas cloradas) ^[1,3]. Relativamente à oxidação, a evaporação dos solventes e a reação da resina com o ar levam à formação de uma película de proteção anticorrosiva, com elevada adesão e resistência química. Neste processo, o veículo não-volátil é geralmente constituído por óleos vegetais, ou resinas alquídicas ou fenólicas modificadas com esses mesmos óleos. O mecanismo que traduz a formação da película consiste basicamente no ataque do oxigénio à dupla ligação presente nos óleos vegetais ^[1].

No que diz respeito à polimerização à temperatura ambiente, a película formada é normalmente constituída por uma resina e um agente de cura ou endurecedor, que reagem quimicamente entre si, à temperatura ambiente. As resinas utilizadas neste mecanismo são geralmente as epoxídicas e as poliuretânicas, sendo as poliaminas e poliisocianatos os endurecedores mais comuns. As películas de tinta, formadas por estes tipos de resinas, caracterizam-se pela elevada resistência à abrasão e ao impacto, além de possuírem boas propriedades de adesão ao substrato. Porém, no que toca à resistência à radiação ultravioleta, apresentam fraca resistência, perdendo o brilho e a cor muito rapidamente ^[1,2].

Finalmente no mecanismo da coalescência existem duas fases distintas, a resina e o meio dispersante. A película plástica, formada na superfície que se pretende proteger, é constituída por um aglomerado de partículas de resina. Este é obtido pela evaporação do meio no qual as partículas se encontravam dispersas. As emulsões aquosas de acetato de polivinilo e acrílicas são as mais usadas na formação da película contínua protetora.

Existem muitos casos onde os materiais revestidos são sujeitos a ambientes extremos, isto é, altamente corrosivos ou altas temperaturas. Além disso, muitas vezes os revestimentos formados devem garantir que determinados requisitos sejam cumpridos, com o intuito de satisfazer as necessidades de um produto específico. Nestes casos, os polímeros de alto desempenho são muito utilizados como veículo fixo, uma vez que apresentam vantagens em relação a outros tipos de veículos, quer em termos de propriedades químicas, elétricas ou mecânicas. Por exemplo, na indústria de utensílios de cozinha é frequente a utilização deste tipo de polímeros, mais precisamente os fluoropolímeros, com o principal objetivo de garantir a antiaderência de corpos ao sistema substrato-revestimento, ou não transmitir odores nem sabor dos alimentos no qual esteve em contacto ^[1].



2.2. FLUOROPOLÍMEROS

Fluoropolímeros ou fluoroplásticos são polímeros olefínicos formados a partir de monómeros olefínicos, parcialmente ou totalmente fluorados. Esta família de plásticos fluorados caracteriza-se por excelentes propriedades, quer a nível químico, mecânico ou elétrico, nomeadamente, a elevada resistência e estabilidade a altas temperaturas, bem como o baixo coeficiente de atrito (estático e dinâmico), quando comparado com a maioria dos materiais. Muitas destas propriedades podem ser explicadas pela presença do átomo de flúor nos polímeros desta classe, uma vez que quanto maior é o teor deste elemento químico, melhores serão as suas propriedades químicas e elétricas ^[11,12].

Os polímeros perfluorados são homopolímeros e copolímeros de tetrafluoretileno (TFE), podendo alguns comonómeros ser constituídos por um monómero que contém uma pequena quantidade de elementos diferentes de carbono ou flúor. Um dos exemplos mais conhecidos dentro desta classe de polímeros é o poli(tetrafluoretileno) (PTFE), mundialmente referido como Teflon[®]. Relativamente aos polímeros ou copolímeros parcialmente fluorados, tomam esta designação, uma vez que os monómeros presentes na sua estrutura possuem átomos de cloro e hidrogénio no lugar dos de flúor. Dentro desta classe de polímeros encontra-se, por exemplo o fluoreto de polivinilideno (PVDF), ou ainda o copolímero de etileno-tetrafluoroetileno (ETFE), comercialmente conhecidos como Kynar[®] ou Tefzel[®], respetivamente ^[11-13].

2.2.1. Politetrafluoretileno – PTFE

O PTFE ($-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$)_n é um homopolímero do TFE ($\text{CF}_2 = \text{CF}_2$), de estrutura linear não-ramificada, sintético, bastante importante na indústria de plásticos, devido a uma grande variedade de excelentes propriedades como a inércia química, a resistência ao calor, isolamento elétrico, baixa energia de superfície ou o baixo coeficiente de atrito (propriedades antiaderentes) a uma vasta gama de temperaturas. Uma das características mais importantes deste polímero consiste no seu comportamento adesivo e no facto de apresentar simultaneamente carácter hidrofóbico e oleofóbico, isto é, não é molhável com qualquer tipo de líquido nem se fixa diretamente a qualquer sólido. Devido à sua elevada massa molecular e inércia química, o PTFE não flui facilmente e não pode ser moldado por técnicas convencionais de extrusão e injeção ^[12-14].

Muitas destas propriedades derivam das ligações fortes interatómicas (C-C e C-F) entre os átomos que constituem a estrutura do polímero, da elevada massa molecular que apresenta, e do tamanho dos átomos de flúor que formam uma camada contínua e uniforme (invólucro) em torno das ligações C-C. A camada formada tem como função crucial proteger a estrutura principal da molécula do ataque de outros átomos, conferindo estabilidade e inércia química ao



polímero. É ainda muito importante no que toca às propriedades de antiaderência do PTFE, uma vez que reduz a energia superficial da molécula, resultando no baixo coeficiente de atrito característico deste tipo de polímeros ^[11-15].

O poli(tetrafluoretileno) pode ser obtido por duas técnicas de polimerização distintas, nomeadamente polimerização em suspensão e em emulsão, produzindo dois tipos diferentes de polímero, quimicamente idênticos. A polimerização em suspensão do TFE é utilizada para produzir uma resina granular de PTFE, já a polimerização em emulsão dá origem a resinas em pó fino de PTFE ou dispersões coaguladas de PTFE ^[11-13,16]. No primeiro caso, o tipo de resinas produzidas caracteriza-se por possuir excelentes propriedades de manuseabilidade e reduzida cristalinidade, que as tornam ideais em aplicações que envolvam moldagem, nomeadamente em tubos, fitas ou outras formas moldadas para aplicações antiaderentes ^[12,13,17,18]. Relativamente às resinas de PTFE obtidas por polimerização em emulsão, a principal diferença está na utilização de um tensioativos ou agente emulsificante, indispensáveis nos produtos de dispersão obtidos por esta técnica. A dispersão é então aplicada por pulverização ou eletrodeposição sobre o substrato que se pretende revestir, com o objetivo de lhe proporcionar resistência química, características antiaderentes e de baixa fricção ^[11-14,16,18,19].

2.2.2. Alternativas ao PTFE

Ainda dentro da classe de polímeros perfluorados, existem polímeros onde na sua estrutura estão incorporados pequenas quantidades de outros monómeros, por exemplo o hexafluorpropileno (HFP). Estas alterações na estrutura do polímero têm como principal objetivo modificar algumas das suas propriedades e/ou características de processamento. Entre os mais utilizados destacam-se as resinas de FEP e de PFA.

FEP – Copolímero de Etileno-Propileno Fluorado: O desejo de encontrar uma resina com propriedades semelhantes às do PTFE, mas que pudesse ser moldada por processos convencionais em estado de fusão, levou à descoberta do FEP. A estrutura deste copolímero aleatório é formada por dois monómeros muito semelhantes, o tetrafluoretileno e o hexafluorpropileno. A única diferença, a nível estrutural, entre o HFP e o TFE, está na substituição de um átomo de flúor por um grupo trifluorometil (CF₃). Pode ser polimerizado quer em meio aquoso, quer em não-aquoso, sendo que as restantes condições são semelhantes à produção de PTFE por polimerização em emulsão. Isto é, no caso particular dos revestimentos com resinas dispersas de FEP, após pulverização da dispersão no substrato, a película forma-se através da evaporação da água e da remoção do tensioativo do revestimento ^[11,13].

PFA – Perfluoroalcóxido: Resulta da copolimerização em fase aquosa do TFE com o éter perfluoropropil-vinílico (PPVE), obtendo-se uma estrutura constituída por fluorocarbonos na cadeia principal, e com éteres perfluorados distribuídos aleatoriamente pelas cadeias laterais.



No que toca às condições de polimerização do PFA, estas são semelhantes às do PTFE e do FEP, podendo ser obtido sob várias formas, como dispersões, pós finos ou grânulos. Este tipo de polímero foi concebido para satisfazer as necessidades da indústria em aplicações químicas, elétricas e mecânicas, devido às excelentes propriedades químicas e mecânicas que apresenta a elevadas temperaturas. Além disso, em situações em que é necessário aumentar a adesividade entre o substrato e o revestimento, é frequente aplicar-se uma camada fina de PFA no substrato e, posteriormente, revesti-lo com uma camada de PTFE ^[11,13,20].

2.2.3. Seleção de um revestimento fluorado

Embora muitas das propriedades dos revestimentos de PTFE, FEP e PFA sejam idênticas, o tipo de substrato que se quer revestir, a temperatura de cozimento a que se pode trabalhar ou as funções que se pretendem para o produto final, são alguns dos fatores que influenciam a escolha de um revestimento em particular. Como foi referido, uma das principais aplicações deste tipo de polímeros está relacionada com a indústria de revestimentos, mais concretamente, com os revestimentos antiaderentes. No que toca às propriedades antiaderentes, as diferenças entre estes três tipos de revestimentos são muito pequenas uma vez que os coeficientes de fricção são praticamente os mesmos. Contudo, os revestimentos de PTFE são os que apresentam o menor valor, quer para o coeficiente de fricção cinético, quer para o estático ^[11,13].

No que toca ao tipo de substrato que se pretende revestir, existem casos em que a temperatura de fusão do material é significativamente menor que a temperatura de cozimento dos revestimentos fluorados, como é o caso do estanho e do chumbo. No caso dos revestimentos à base de PTFE e PFA, os substratos devem resistir a temperaturas na ordem dos 370°C, enquanto para os revestimentos de FEP este valor é sensivelmente mais baixo (aproximadamente 340°C) ^[11-13]. Relativamente à resistência química, apesar de serem inertes à maioria dos produtos químicos, os revestimentos de PTFE são relativamente porosos e, por isso, permeáveis ao vapor de água e outros gases. Por sua vez, os revestimentos de FEP apresentam uma superfície não porosa, ou seja, mais resistente do que os revestimentos de PTFE, mas menos resistente que os de PFA. Finalmente, em termos monetários, o PFA é o que apresenta maior custo, uma vez que o comonomero utilizado (PPVE) é praticamente tão caro como o PFA. Por sua vez, o FEP é muito mais caro que o PTFE, devido ao elevado custo do HFP ^[11-13].

Atualmente existem diversos fabricantes de revestimentos antiaderentes, nomeadamente a “DuPont”, a “Weilburger Coatings”, a “Whitford Liquid Products”, entre outros. Muitas destas empresas são responsáveis pelo forte crescimento que os revestimentos fluorados tiveram nos últimos anos, não só a nível das várias opções de revestimentos existentes, mas principalmente pela introdução de diferentes tecnologias com o objetivo de responder a algumas das suas principais lacunas, nomeadamente a dureza ou o desgaste ^[11,13].



2.2.4. Alternativas aos revestimentos fluorados

A crescente utilização de fluoropolímeros nos mais diversos ramos da indústria deve-se essencialmente às características únicas desta classe de polímeros, nomeadamente e tal como já foi referido anteriormente, a elevada durabilidade, versatilidade ou resistência ao calor. Contudo, nos últimos tempos tem-se procurado melhorar algumas das propriedades deste tipo de revestimentos, por exemplo, a resistência ao desgaste, a condução do calor na sua superfície ou ainda, em alguns casos procurar que a sua superfície seja mais hidrofílica. Uma vez que um revestimento fluorado é um mau condutor de calor, ou seja, é muito difícil a transferência de calor da fonte de energia ao alimento, no caso de utensílios de cozinha. procura-se que a espessura do revestimento seja muito fina, para que se consiga, com maior rapidez, atingir uma determinada temperatura. Contudo, este facto torna o revestimento mais vulnerável ao desgaste e, por isso, menos durável ^[11,21].

No que diz respeito aos revestimentos antiaderentes, têm-se desenvolvido esforços para encontrar outras alternativas aos revestimentos fluorados. Entre as principais tecnologias em constante evolução destaca-se a “sol-gel” (revestimentos cerâmicos), que será explicada sucintamente a seguir. Por sua vez, existem ainda os revestimentos à base de silicões, que também são uma alternativa aos revestimentos antiaderentes fluorados mas, neste caso, além das características de antiaderência desaparecerem rapidamente, também não oferecem grande resistência ao desgaste. Muitas vezes são utilizados no revestimento de produtos de cozinha de baixa gama, por serem menos dispendiosos que os restantes ^[21-23].

2.2.4.1. Tecnologia Sol-gel – “Revestimentos cerâmicos”

Os primeiros revestimentos produzidos com base na tecnologia sol-gel surgiram em meados de 2005, e causaram um enorme impacto na sociedade por afirmarem ser “amigos do ambiente”, uma vez que não continham PFOA (Ácido perfluorooctanóico). Convém lembrar que no mesmo ano, a EPA (agência de proteção ambiental) mostrou a sua preocupação em relação à utilização dos revestimentos de PTFE em contacto com a comida, uma vez que foram encontrados níveis de PFOA (cancerígeno e tóxico) no sangue de pessoas ^[21].

Os revestimentos sol-gel são muitas vezes referidos como revestimentos “cerâmicos”, pois apresentam grande parte das características da cerâmica, mas em menor escala. Isto é, devemos descrever este tipo de revestimentos como um tipo de cerâmica, uma vez que a cerâmica é um termo muito amplo, pois os seus produtos podem ser associados a vários setores da indústria, tais como tijolos, tubos, revestimentos de fornos ou louças ^[21].

Para melhor compreender os processos envolvidos nesta tecnologia, o mais simples é começar pela descrição da definição etimológica. Um “sol” é uma dispersão coloidal de um



sólido em meio líquido ou gasoso, que é submetida a hidrólise e policondensação (ativação) de modo a formar um “gel”. Por sua vez um “gel” pode ser descrito como um sistema de duas fases, um corpo sólido e um corpo líquido ou fase gasosa que preenche o sistema poroso. O gel é então aplicado sobre a superfície e, após ser seco, forma um revestimento com aspeto cerâmico ^[21,24,25].

A principal diferença neste tipo de revestimentos está na sua formulação, ou seja, enquanto nos revestimentos tradicionais a resina já chega pré-polimerizada, bastando misturá-la com um solvente apropriado para posterior aplicação e formação da película, com a tecnologia sol-gel a “resina” é sintetizada durante a fase de cura. Isto é, os formuladores iniciam a aplicação com os “monómeros” e a película de polímero é formada na superfície a revestir por reação química durante o processamento. De forma análoga aos revestimentos fluorados, é necessária uma etapa prévia de preparação da superfície, sendo fundamental que a superfície esteja a uma temperatura entre 50 a 70°C. No que toca à aplicação dos revestimentos sol-gel, não é necessária qualquer linha de pulverização especial ^[21].

Os revestimentos sol-gel apresentam muitas diferenças em relação aos revestimentos fluorados. Uma das características que mais os distingue é a multiplicidade de cores que a película pode apresentar, mantendo-as inalteráveis a elevadas temperaturas. Pelo contrário, a maior parte dos revestimentos de fluoropolímeros são pretos ou cinzentos. No que diz respeito à resistência à temperatura, a diferença é muito significativa entre ambos. O PTFE começa a perder muitas das suas propriedades a partir dos 260°C, ao invés dos cerâmicos que podem ser expostos continuamente até cerca de 350°C, sem prejuízo para as características antiaderentes. Relativamente à resistência à corrosão e abrasão, os revestimentos sol-gel são mais duros e menos dúcteis que os revestimentos fluorados. A principal desvantagem está na durabilidade das suas propriedades antiaderentes que, apesar de em muitos casos serem superiores às dos revestimentos convencionais, tendem a deteriorar-se ao longo do tempo ^[21].

Um dos exemplos mais conhecidos deste tipo de tecnologia são os revestimentos “Fusion” da “Whitford”, que se distinguem por tirar o melhor proveito do inorgânico e do orgânico das cerâmicas e dos polímeros, nomeadamente a resistência, a impermeabilidade, a estabilidade térmica e, ainda oferecer a inércia química e propriedades antiaderentes dos materiais poliméricos ^[21].



2.3. ALUMÍNIO COMO SUPORTE AO PTFE

Como foi referido na secção anterior deste capítulo, existe uma vasta gama de substratos que podem ser revestidos com fluoropolímeros. Contudo, é fundamental que sejam térmica e dimensionalmente estáveis à temperatura de cozimento das resinas de PTFE, para que não ocorra qualquer tipo de falha na formação da película antiaderente sob essa superfície ^[11,21].

Dentro dos vários tipos de substrato, o alumínio é um dos metais não-ferrosos mais utilizados como suporte aos revestimentos antiaderentes fluorados, não só pelo facto de ser completamente estável à temperatura de processamento destas resinas, mas principalmente devido à grande variedade de propriedades mecânicas e físicas que podem ser obtidas com as suas ligas. Entre estas propriedades destaca-se o facto de ser um excelente condutor de calor e um metal bastante resistente à corrosão, em função da fina camada de óxido de alumínio que se forma na sua superfície. Além disso, é considerado um material leve, de fácil manuseamento, com baixa densidade, elevada razão resistência mecânica/densidade, boa aparência e baixo custo ^[24-26].

Além de todas estas características inerentes ao alumínio e às suas ligas, é fundamental perceber de que forma a microestrutura da sua superfície influencia a adesão ao revestimento de PTFE. A superfície do alumínio é geralmente lisa e macia, não constituindo por isso uma boa base de adesão de revestimentos fluorados (orgânicos). Porém, quando esta é tratada, nomeadamente por tratamentos químicos ou físico-químicos, torna-se particularmente estável e propícia à interação revestimento-substrato. Por tudo isto, pode afirmar-se que o desempenho de um determinado revestimento depende diretamente da limpeza e do tratamento da superfície que se quer proteger ^[11,24,27].

Neste capítulo serão abordados os principais tratamentos de superfície utilizados industrialmente para o caso do alumínio, e a sua importância na microestrutura da superfície do metal, nomeadamente no que respeita à ligação substrato-revestimento.

2.3.1. Química da Superfície – Adesão ao alumínio

Nesta secção procurar-se-á explicar de que forma a microestrutura e química da superfície de contacto do alumínio, assume um papel fundamental na conceção de sistemas de revestimento com elevada durabilidade. O termo superfície de contacto é definido como a porção do substrato que interage com o adesivo, neste caso o revestimento de PTFE, em termos de área e profundidade da interação. Uma superfície que apresente irregularidades ao nível microscópico, nomeadamente em termos de rugosidade, pode afetar seriamente as ligações químicas e/ou mecânicas entre o substrato e o revestimento. Isto é, no caso da rugosidade da superfície apresentar vales pontiagudos ou profundidade exagerada, a penetração e a



molhabilidade do adesivo pode ficar seriamente comprometida, podendo acarretar problemas de corrosão ou de resistência mecânica. Por sua vez, quanto mais rugosa é uma superfície, maior é a sua área de contacto com o adesivo, o que possibilita uma melhor distribuição das forças químicas (iónicas, metálicas ou covalentes) e mecânicas (macro e micromecânicas) entre os dois materiais a serem unidos ^[24,28,29].

Outro fator que influencia o contacto íntimo substrato-revestimento prende-se com a composição química da superfície do metal, que muitas vezes pode ser diferente daquela que constitui o seu substrato. Estas camadas presentes na superfície podem ser formadas por óxidos, hidróxidos, gases absorvidos ou ainda contaminantes auxiliares de processamento, como lubrificantes, óleos ou outras substâncias, que nem sempre estão distribuídos homogeneamente pela superfície, podendo gerar descontinuidades ao nível da interação com a resina. Isto é, basta uma única camada com a espessura de uma molécula de contaminante (monocamada) para impedir que o revestimento tenha boa molhabilidade na superfície, ou seja, o revestimento vai interagir primeiramente com o contaminante e só depois com o substrato ^[24,28].

Pelo acima exposto, pode-se afirmar que as características e as propriedades da camada superficial de um substrato assumem um papel crucial no desempenho de um revestimento. Além de ser fundamental que a resina possua uma boa interação com a camada presente na superfície do metal, seja por forças eletrostáticas ou por ação química, é muito importante que esta camada adira bem ao substrato (adesão), e não seja facilmente desfeita (coesão). Este conceito de adesão e coesão será abordado com mais detalhe na secção 5 deste capítulo ^[24,29,30].

No caso específico do alumínio, apesar da sua superfície ser muito pouco rugosa o que dificulta a molhagem do revestimento na superfície, possui uma camada de óxido que promove uma melhor fixação do revestimento e que apresenta boa adesão ao substrato. Porém, devido às condições de produção e processamento a que as ligas de alumínio são sujeitas, a composição desta camada apresenta uma série de contaminantes que impedem que o sistema substrato-revestimento possua a resistência ou durabilidade desejada. O processo de pré-tratamento da superfície do alumínio assume, por isso, um papel fundamental na força e resistência de adesão do sistema. Este tem como principal objetivo a remoção de contaminantes como óleos, gorduras, óxidos metálicos, humidade ou outras sujidades que possam interferir de diversas formas na adesão, homogeneidade e durabilidade do revestimento ^[24,27,28,30].

Existem diversos métodos de tratamento de superfícies, porém, neste capítulo dar-se-á um maior foco aos tratamentos químicos, não só por serem os mais utilizados industrialmente no caso do alumínio, mas principalmente, porque serão objeto de discussão ao longo desta dissertação. Além deste método de tratamento, existem ainda os tratamentos térmicos, os de difusão, os de bombardeamento iónico e os físico-químicos. A utilização de determinado



tratamento em detrimento de outro, depende de diversas variáveis, nomeadamente do tipo da liga, do seu uso final, de condições económicas, ou ainda da quantidade e qualidade das impurezas e sujidades a serem removidas. Isto é, um material frágil não pode suportar um processo mecânico, assim como um material poroso não pode ser tratado por via química, uma vez que a solução ficaria retida nos seus poros ^[1,24,27,31].

2.3.2. Tratamentos Químicos e Físico-Químicos

Dentro deste tipo de tratamentos de superfície existem basicamente dois processos distintos, no entanto com a mesma finalidade, isto é, aqueles em que se altera a composição química da superfície, e aqueles em que se remove os contaminantes presentes na sua superfície. No primeiro caso, a alteração da composição química da superfície conduz à formação de películas com características protetoras (anticorrosivas), que também contribuem para aumentar a adesão aos revestimentos. Dentro deste tipo de tratamento citam-se os mais importantes industrialmente, nomeadamente a passivação crômica, a fosfatação e a anodização ^[1,7,8,9,31].

Relativamente ao segundo caso, define-se como o processo de limpeza, ou de preparação da superfície, um conjunto de operações que conduzem à remoção dos contaminantes, quer de natureza orgânica (desengorduramento), quer inorgânica (decapagem química), com o principal objetivo de se obter uma superfície limpa. Dentro deste conjunto de operações, cita-se a limpeza inicial ou desengorduramento, a decapagem ácida ou básica, ou ainda outros processos que conduzam também a uma superfície livre de contaminantes e quimicamente ativa, como a lavagem do substrato com água corrente ou ainda a evaporação da humidade ou outros resíduos presentes na sua superfície ^[1,24,31,32].

2.3.2.1. Desengorduramento

O desengorduramento é uma etapa fundamental não só no que diz respeito à remoção de contaminantes líquidos (óleos) e semissólidos (gorduras e pastas) da superfície da placa, mas também porque a presença destas substâncias prejudica fortemente a ação do banho de decapagem. Por estes motivos, geralmente é a primeira etapa de qualquer processo de limpeza de uma superfície metálica e, conseqüentemente, a etapa preliminar da decapagem. Existem várias técnicas de desengorduramento, sendo que as mais utilizadas industrialmente são o desengorduramento por imersão, por aspersão ou ainda por ação manual ^[26,31,33,34].

A composição de um banho de desengorduramento é dividida em duas fases, uma inorgânica (constituída por um desengordurante e um agente quelante), e outra orgânica (tensioativo). A parte inorgânica pode ser formada por três tipos diferentes de desengordurantes: alcalinos, ácidos ou outros solventes específicos. No caso do alumínio, os desengordurantes alcalinos são os mais utilizados industrialmente, não só devido ao seu reduzido custo, mas



principalmente pelo facto de apresentarem elevada capacidade desengordurante e não corroerem os equipamentos. Geralmente são constituídos por hidróxidos, fosfatos, carbonatos ou silicatos, contendo ainda na sua formulação inibidores para que não ocorra a corrosão do alumínio [24,26,31].

Os solventes industriais específicos não são mais do que hidrocarbonetos clorados, como por exemplo, o tricloroetileno e o 1-1-1- tricloroetano que são muito utilizados na remoção das sujidades da superfície do metal, contudo apresentam elevada toxicidade e inflamabilidade.

Finalmente, no que toca ao desengorduramento com produtos ácidos, à base de ácido sulfúrico, apesar destes proporcionarem uma superfície completamente limpa e formarem finas camadas de óxido na superfície do alumínio (condições fundamentais para o excelente desempenho de revestimento de conversão química), têm algumas desvantagens face aos produtos de desengorduramento alcalinos. O elevado custo, a corrosão dos equipamentos, as dificuldades de controlo do banho ou de tratamento das águas residuais, são alguns destes fatores [24,26].

No que diz respeito à fase orgânica, o tensioativo é responsável não só por remover os contaminantes da superfície do metal, mas também por reter a sujidade para que esta não volte a depositar-se na sua superfície. Isto é, os tensioativos são moléculas com uma parte hidrofóbica (solubilidade em óleo) e outra hidrofílica (solubilidade em água). A porção hidrofóbica é responsável por envolver o óleo contido no metal, formando um agregado (micela). Por sua vez, a porção hidrofílica é responsável por manter a emulsão, ou seja, estabilizar as gotas de óleo em solução após estas terem sido removidas da superfície do metal [24,26].

2.3.2.2. Decapagem química

A decapagem química é muito utilizada industrialmente quando se pretende revestir um determinado substrato metálico. Para isso, é fundamental que a sua superfície se apresente completamente livre de contaminantes, mais especificamente óxidos ou outros produtos de corrosão. Além de tudo isto, é responsável por tornar a superfície do metal mais homogénea e rugosa, isto é, ativar a microestrutura da sua superfície para uma maior adesão ao revestimento [1,24,26, 31].

A composição de um banho de decapagem depende essencialmente da natureza do metal a proteger, do tipo de revestimento a ser aplicado e dos aspetos económicos que lhe são inerentes. Este pode ser constituído por dois diferentes tipos de decapantes: ácidos e alcalinos. No caso específico do alumínio, a decapagem alcalina é muito pouco utilizada uma vez que ocorre o ataque ao metal pela ação de bases como o NaOH ou o KOH. Além disso, apresenta



também desvantagens face à decapagem ácida, por exemplo, o facto de ser necessário um maior tempo de tratamento, operar a temperaturas mais elevadas, ou ainda a incapacidade de atuar sobre certos óxidos ^[1,26].

Muitos destes fatores fazem com que a decapagem ácida seja muito utilizada industrialmente para o tratamento do alumínio. Um banho de decapagem ácida é geralmente constituído por misturas de ácido sulfúrico e crómico, sendo que também são utilizadas muitas vezes misturas de ácido nítrico/fluorídrico, sulfúrico/nítrico ou crómico/fosfórico. Estes são responsáveis por reagir com os óxidos ou outros produtos de corrosão presentes na superfície do alumínio, produzindo sais solúveis e fáceis de serem removidos por lavagem com água corrente. A lavagem assume-se como uma etapa fundamental do processo de tratamento do alumínio, e será abordada detalhadamente ainda nesta secção. Normalmente são ainda adicionadas pequenas quantidades de inibidores de corrosão e tensioativos aos banhos, com o principal objetivo de impedir que o ataque ácido progrida após remoção de todos os contaminantes, bem como para melhorar a penetração dos ácidos no metal e facilitar a subsequente lavagem, respetivamente ^[1,24,26,35].

2.3.2.3. Águas de lavagem

Como foi referido anteriormente, após as etapas de desengorduramento e decapagem da superfície do alumínio é fundamental que ocorra o enxaguamento com água corrente do metal. O principal objetivo desta etapa consiste na remoção dos resíduos provenientes das etapas acima mencionadas, uma vez que estes poderiam não só contaminar as etapas posteriores, mas também prejudicar fortemente a qualidade do produto final. Por exemplo, se após a etapa de decapagem ácida não existisse o enxaguamento com água da superfície do metal, os resíduos de tensioativos, os inibidores, assim como os sais formados ou o excesso de decapante, ficariam depositados na sua superfície. Esta situação poderia levar à formação de cristais na superfície do metal e, conseqüentemente, ao aparecimento de manchas e diminuição da resistência à corrosão por parte do alumínio ^[1,26,36,37].

2.3.2.4. Secagem

Na última etapa do processo de tratamento da superfície do alumínio ocorre geralmente a secagem ou evaporação dos resíduos líquidos provenientes das etapas anteriores. Essencialmente durante esta fase ocorre não só a volatilização da humidade ou de outros resíduos depositados na superfície do metal, bem como, em alguns casos, o melhoramento do posterior contacto substrato-revestimento, através da ligação térmica ^[31,38].



2.4. APLICAÇÃO E PROCESSAMENTO DE UM REVESTIMENTO DE PTFE

Numa fase inicial desta revisão bibliográfica procurou-se abordar individualmente cada constituinte do sistema substrato-revestimento de PTFE, enunciando algumas das suas principais características que tornavam possível a conceção de revestimentos com elevada durabilidade. No caso dos revestimentos fluorados foi referido na secção 2 deste capítulo que, devido à sua reduzida energia de superfície, ao serem aplicados sobre uma determinada superfície, espalhavam-se com facilidade, conseguindo um contacto íntimo com o substrato. Por sua vez, na secção 3 deste capítulo, apresentou-se um conjunto de operações que aumentavam a rugosidade da superfície do alumínio e, consequentemente, a sua área superficial, tornando-a mecanicamente ativa, ou seja, propícia à interação substrato-revestimento.

Apesar dos fluoropolímeros apresentarem baixa energia de superfície, existem alguns casos em que não se verifica uma perfeita adesão da resina de PTFE ao substrato. Diversas causas podem estar na origem deste tipo de problemas, sendo que o carácter antiaderente dos revestimentos fluorados muitas vezes está associado à dificuldade em conseguir uma perfeita interação com o substrato. Para combater este facto, muitas vezes são adicionados ao revestimento antiaderente aglutinantes ou ligantes não fluorados que proporcionam uma melhor adesão ao substrato e coesão entre as partículas do revestimento, como será demonstrado ao longo deste subcapítulo. Procurar-se-á ainda abordar os principais métodos de aplicação do antiaderente na superfície do alumínio e a forma como as resinas de PTFE são convertidas num filme sólido e contínuo sobre o substrato.

2.4.1. Composição de um revestimento antiaderente

Os quatro componentes básicos que compõem um revestimento antiaderente de PTFE são: os solventes, os aglutinantes ou ligantes, os pigmentos e cargas, e os aditivos. O solvente ou veículo volátil é responsável por manter todos os outros constituintes da tinta suspensos, permitindo que estes se espalhem sobre a superfície do substrato. Alguns dos solventes mais utilizados na diluição deste tipo de resinas são a água, a NMP (N-metil-2-pirrolidona) ou a DMF (dimetilformamida), porém uma vez que todos os fatores apresentados influenciam a estabilidade e qualidade do revestimento final, os sistemas de solventes são normalmente formulados pelo fornecedor^[11,21].

O ligante inclui geralmente todos os materiais poliméricos que se encontram dispersos, ou suspensos no solvente e que após um processo de cozimento se tornam sólidos, constituindo assim o filme de tinta que se forma na superfície do substrato. Muitas das propriedades físicas fundamentais do revestimento final dependem da natureza do ligante polimérico. A maioria dos revestimentos antiaderentes é constituída por uma mistura de ligantes, isto é, fluoropolímeros e outros ligantes não-fluorados, por exemplo o PAI (poliamida-imida) ou PES (poli(éter sulfona),



do inglês). O principal objetivo da utilização de misturas de ligantes prende-se com a obtenção de um revestimento com elevada concentração de polímero fluorado à superfície (antiaderente), e com concentração elevada de outro ligante no substrato (adesão), fenómeno que é designado por estratificação ^[11,27].

Finalmente, os pigmentos e cargas são pequenas partículas que são adicionadas às tintas para conferir cor, afetar as propriedades físicas, como a dureza ou a resistência à abrasão, ou ainda para influenciar a viscosidade, o brilho, a condutividade térmica e elétrica, entre outras propriedades. Já os aditivos são muitas vezes inseridos na tinta para resolver determinados problemas ou conseguir efeitos específicos, por exemplo os tensioativos na estabilização de dispersões ^[11,21].

2.4.2. Métodos de aplicação de revestimentos líquidos

Existem dezenas de formas de aplicação de revestimentos líquidos, todas elas com diferentes características, benefícios, vantagens e desvantagens. Nesta revisão procurar-se-á descrever sucintamente as principais técnicas de aplicação de revestimentos fluorados, tendo sempre em conta as suas propriedades e o tipo de superfície onde vão ser aplicados. Existem essencialmente dois tipos básicos de técnicas de aplicação de revestimentos de PTFE: os métodos por pulverização e os de aplicação em massa (grandes quantidades). Se o primeiro caso implica pintar uma peça de cada vez, como são exemplo os métodos onde se utilizam pulverizadores convencionais, HVLP (*“High-Volume, Low-Pressure”*), ou ainda eletrostáticos, o segundo implica o revestimento de muitas peças de uma só vez ou continuamente, como a pintura por imersão, por rolo (*“Roller coating”*), ou ainda por cortina (*“Curtain coating”*). Apenas os métodos por pulverização convencional e eletrostáticos serão abordados detalhadamente nesta secção, uma vez que serão objeto de discussão ao longo desta dissertação, remetendo-se os restantes para a bibliografia recomendada ^[4,11,21,39,40].

2.4.2.1. Pintura por pistola convencional

É o método de aplicação de revestimentos fluorados mais tradicional utilizado na indústria, principalmente em operações mais pequenas, minuciosas ou de repintura. A tinta líquida depositada num recipiente próprio é conduzida para o bico da pistola de pulverização e atomizada pela ação da elevada pressão do ar. Ao ser reduzida a gotas muito pequenas de líquido, a tinta é levada pelo mesmo ar comprimido que a pulverizou até à superfície da peça, neste caso o substrato alumínio. A elevada durabilidade, a aparência limpa e suave, ou a obtenção de uma película de espessura praticamente uniforme ao longo de toda a superfície pintada, são algumas das principais vantagens do revestimento obtido por este método de aplicação. Por sua vez, além de apresentar uma baixa taxa de produção (cerca de metade da



velocidade de produção de outros métodos), geralmente neste tipo de tecnologia estima-se que 35% a 50% da tinta é desperdiçada durante a sua aplicação ^[11,27,39].

Um dos requisitos mais importantes deste método está relacionado com a viscosidade que a tinta deve apresentar. Regra geral, as tintas são fornecidas com alta viscosidade com o principal objetivo de manter os pigmentos em suspensão, devendo por isso ser diluídas no momento do seu uso para que flua com relativa facilidade. Este método requer que a tinta seja diluída mais que em qualquer outro método, uma vez que é necessário que esta flua facilmente do recipiente até à pistola pela ação do ar. Como consequência deste facto, uma das desvantagens desta excessiva diluição prende-se com a evaporação posterior do solvente, uma vez que ocorre uma redução significativa da espessura da película húmida para a seca. Além disso, a acumulação exagerada de solventes quando a aplicação é realizada em ambientes fechados, aumenta o risco de segurança industrial ^[11,21,41].

Existem dois tipos de equipamentos apresentados como pistola convencional: no mais simples, o recipiente que contém a tinta está acoplado diretamente na pistola, sendo a tinta transferida por sucção para a pistola (pistola de caneco); no outro, a tinta depositada num grande recipiente, chega à pistola devido à pressão do ar injetado dentro do recipiente. O primeiro caso apresenta algumas desvantagens face ao segundo, uma vez que é necessário estar constantemente a interromper a aplicação da tinta para encher o recipiente. Além disso, a pistola de pulverização é bastante mais leve no segundo caso, uma vez que o recipiente que contém a tinta não está acoplado à mesma, como se verifica no primeiro caso ^[4,11,40,41].

2.4.2.2. Pintura eletrostática

Neste método de aplicação, como o próprio nome indica, estão envolvidas cargas eletrostáticas. A tinta é eletrizada na pistola durante a pulverização e projetada contra o substrato que deve obrigatoriamente possuir carga de sinal contrário. Isto é, a tinta antiaderente é carregada positivamente com uma voltagem eletrónica criada por um gerador de alta-voltagem, sendo posteriormente projetada sobre a superfície de alumínio que se encontra ligada à terra, tornando-se assim o ponto final de um forte campo elétrico. As partículas de tinta tendem a mover-se ao longo das linhas de energia eletromagnética deste campo elétrico, uma vez que são atraídas pela diferença de potencial em relação à superfície do alumínio ^[11,21].

Enquanto no método anterior as partículas de tinta que não atingem a superfície são perdidas, na pintura eletrostática a tinta, por estar eletrizada, é atraída pelo campo eletrostático e, por sua vez, as partículas que seriam perdidas durante a pulverização são também atraídas para a peça. Por esta razão, o aproveitamento de tinta neste método é consideravelmente superior aos restantes métodos, estimando-se que ocorra um aumento da eficiência de transferência da tinta em cerca de 25% a 50%. ^[11,21].



2.4.3. Processamento de revestimentos fluorados

Uma grande percentagem dos problemas de desempenho dos revestimentos antiaderentes, comunicados aos fabricantes de revestimentos pelos aplicadores, deve-se a problemas durante a fase de processamento. Na secção 1 desta revisão enunciaram-se algumas das principais formas de conversão de um filme húmido de tinta num filme sólido e compacto. Por sua vez, na secção anterior foi referido que o alumínio era um dos metais não-ferrosos mais utilizados como suporte aos revestimentos antiaderentes, principalmente pelo facto de ser termicamente estável à temperatura de cozimento deste tipo de tintas, na ordem dos 340-370°C. Nesta etapa, pretende-se demonstrar de que forma os revestimentos de PTFE passam por todo este processo, formando posteriormente uma camada muito fina, adesiva e coesa sobre a superfície do alumínio ^[11].

Um ponto muito importante consiste na designação que muitas vezes é utilizada para este processo. O termo “cura” é muitas vezes empregue para descrever o processo de conversão da camada de tinta líquida de PTFE numa película sólida. Porém, este termo é completamente inadequado uma vez que se refere ao endurecimento do material polimérico através da reticulação das cadeias de polímero (“*Crosslinking*”), ou seja, às ligações entre moléculas, produzindo polímeros tridimensionais com elevada massa molecular. Neste caso específico não existe qualquer tipo de reação de polimerização ou alteração química durante a fase de processamento, não só porque não se irradia qualquer polímero durante esta etapa mas, principalmente, porque a tinta pulverizada não possui na sua composição qualquer tipo de agente de cura. Por estas razões, o processamento deste tipo de revestimentos é simplesmente designado como um processo de fusão da tinta ou cozimento ^[11,21,27].

O processamento de revestimentos fluorados é praticamente o mesmo para quase todos os tipos de resina (PTFE, FEP, PFA), diferenciando-se em alguns casos apenas nas condições a que devem ser sujeitas, nomeadamente temperatura e tempo de cozimento. O revestimento fluorado depositado sobre a superfície do alumínio deve ser submetido a três diferentes zonas de aquecimento, demorando cerca de 15 minutos a concluir este processo. A primeira etapa corresponde ao momento em que a água ou outros solventes são removidos do revestimento, devendo a temperatura do forno rondar os 149 ±28°C. Deve-se evitar que a temperatura nesta fase exceda o valor indicado, pois caso contrário o solvente pode entrar em ebulição rapidamente, o que vai perturbar fisicamente a formação do filme. Na etapa seguinte, a temperatura deve ser aumentada para valores próximos dos 371°C, uma vez que os solventes neste momento já foram removidos. Nesta fase a poliamida-imida (PAI) presente no revestimento ao reagir liberta uma molécula de água, dando início ao fenómeno de estratificação. Além disso, outros materiais voláteis sofrem decomposição, nomeadamente tensioativos, solventes de alto ponto de ebulição e, possivelmente, outros aditivos. Finalmente,



na última etapa a temperatura é aumentada para um valor superior ao da temperatura de fusão das resinas de PTFE (371-438°C), submetendo-se o revestimento a estas condições durante sensivelmente três a cinco minutos. Convém relembrar, que esta temperatura vai depender do sistema substrato-revestimento em questão, tal como foi referido no capítulo anterior. Nesta fase, pretende-se que o PTFE ou os polímeros fluorados se fundam e desenvolvam as propriedades da película final. Os restantes componentes voláteis, agentes tensioativos ou outros aditivos devem decompor-se em compostos de baixo peso molecular, a fim de se tornarem voláteis. Esta é uma das principais razões pela qual a presença de oxigénio no forno de ar é importante em muitos sistemas de revestimento ^[4,21,27].

2.5. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MORFOLÓGICA

Nas secções anteriores fez-se referência a alguns conceitos associados ao contacto substrato-revestimento de PTFE que procuravam classificar as suas interações moleculares, nomeadamente a adesão, a energia de superfície, a molhabilidade, ou ainda a coesão. A resistência de um revestimento depende da aderência entre a camada e o substrato, bem como da coesão entre as partículas depositadas. Desta forma, a aderência assume-se como um requisito essencial para o bom desempenho do revestimento, pois de nada adianta ter uma camada com espessura ideal e livre de poros se a mesma não tem aderência suficiente ^[28,42,43].

De uma forma geral, pode-se afirmar que as propriedades físicas e o comportamento mecânico de uma camada depositada sobre a superfície do substrato dependem da aderência entre a tinta e o substrato, da coesão entre as partículas do revestimento, do tamanho e morfologia dos poros, e da microestrutura da superfície do substrato. Neste subcapítulo procurar-se-á estudar alguns destes termos, associando-os a algumas técnicas que possibilitam uma melhor perceção da sua influência no contacto entre os componentes do sistema substrato-revestimento ^[29,30,43].

2.5.1. Adesão

A adesão é uma manifestação das forças atrativas que existem ao nível molecular. Regra geral, ela é medida como a força necessária para separar o revestimento do substrato, sendo o pré-tratamento adequado da superfície, como já foi referido, um fator determinante para a obtenção de sistemas com elevada durabilidade e resistência. Além do tratamento superficial do substrato, a interação entre os componentes que fazem parte do sistema assume também um papel essencial na qualidade do revestimento formado ^[28,43].

As forças adesivas e coesivas podem ser classificadas como primárias e secundárias. O primeiro caso diz respeito às forças covalentes, iónicas e metálicas, sendo importante referir que não estão presentes na maioria dos adesivos. Por sua vez, as forças secundárias (também

chamadas de forças de van der Waals) são referidas como as ligações dipolo induzido (forças de London) e dipolo permanente, sendo as mais importantes no que toca à adesão. Existem diversas teorias que procuram explicar os fenómenos que ocorrem na adesão, gerando muitas das vezes alguma controvérsia entre elas. Não é do âmbito desta revisão abordar detalhadamente cada uma destas teorias, remetendo-se para a bibliografia recomendada todos os seus princípios, fundamentos e controvérsias. Essencialmente existem forças de adesão de origem química, mecânica e eletrostáticas. No primeiro caso, temos a teoria de adsorção e difusão que procuram explicar o contacto químico entre as interfaces, através de ligações químicas diretas. Relativamente às forças mecânicas, mostra-se de que forma a superfície do substrato influencia o contacto substrato-revestimento. Finalmente, através das forças eletrostáticas procura-se explicar o contacto através da teoria eletrostática. Contudo, tendo em conta as excelentes propriedades de isolamento elétrico dos polímeros, esta teoria torna-se muito complicada de adaptar a este caso ^[29,30,43-46].

2.5.2. Ângulo de contacto

As forças de interação entre o revestimento e o substrato podem ser expressas como o trabalho necessário para ocorrer uma separação das duas superfícies, ou para haver uma separação entre as moléculas de um material sólido. Esta força muitas vezes é designada como energia livre de superfície e, é dependente das forças intermoleculares que existem no material no espaço intramolecular. A quantificação da energia de superfície de um dado material sólido pode ser conseguida através das medições de ângulos de contacto, entre uma gota de um líquido (geralmente água) com uma tensão superficial conhecida sobre uma superfície sólida. O ângulo de contacto entre uma gota de líquido e uma superfície vai depender do balanço entre as forças adesivas, que fariam a gota espalhar-se sobre a superfície, e as forças coesivas do líquido que contraem a gota na forma de uma esfera com superfície mínima ^[28,43,44].

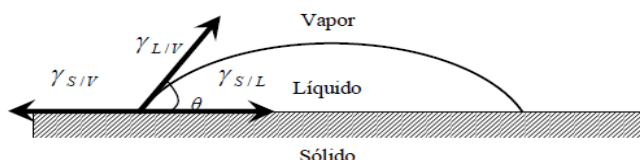


Fig. 2.5.1 – Representação esquemática do equilíbrio das tensões superficiais entre sólido, líquido e vapor, formando o ângulo de contacto Θ ^[42].

O líquido selecionado vai determinar o grau de molhabilidade e de interação com o substrato. Este deve ser pouco volátil, pouco viscoso e não reagir com a superfície. Para valores de Θ superiores a 90° , diz-se que o líquido não molha a superfície sólida. Por sua vez, quando o ângulo é inferior a 90° , o líquido espalha-se na superfície. Existe ainda o caso de molhabilidade total, isto é, quando o líquido se espalha indefinidamente sobre a superfície sólida ($\Theta=0^\circ$). Ainda da análise do ângulo de contacto é possível verificar se uma superfície é hidrofóbica ou



hidrofílica, isto é, para valores de ângulo de contacto elevados diz-se que a superfície é hidrofóbica, já para valores reduzidos diz-se que é hidrofílica ^[28,42,43,45].

A molhabilidade é um conceito que traduz a capacidade de um líquido molhar um sólido, isto é, refere-se à manifestação macroscópica da interação entre líquidos e sólidos em contacto direto na interface. Desta forma, verifica-se que quanto maior é a molhabilidade maior é a interação da superfície com o líquido. Como foi referido nesta revisão, as superfícies metálicas geralmente passam por tratamentos específicos de superfície, com o principal objetivo de melhorar a sua molhabilidade pelo revestimento. No entanto, deve referir-se que as considerações acima feitas consideram apenas superfícies lisas. Porém, o conceito de molhabilidade está também intrinsecamente relacionado com a rugosidade da superfície ^[41,42,43].

2.6. ANÁLISE DE MODO E EFEITOS DE FALHA POTENCIAL – FMEA

A FMEA (Análise de Modo e Efeito de Falha) é uma ferramenta da qualidade que consiste num método de análise de risco qualitativo que permite avaliar, a partir da identificação de potenciais falhas, as causas e a sequência de efeitos de cada uma sobre o desempenho do produto ou processo. Este método permite ainda identificar problemas que necessitam de atenção imediata, e definir um conjunto de ações preventivas que devem ser implementadas de forma a eliminar ou mitigar a ocorrência de outras falhas. Por vezes é frequente ampliar a extensão deste método para uma análise semi-quantitativa, analisando a criticidade dos modos de falha, isto é, procura-se caracterizar o impacto que cada um dos modos de falha tem na fiabilidade do sistema. Nestes casos, o método passa a ser designado por FMECA (Análise de Modo, Efeito e Criticidade de Falha) ^[47,48].

Esta metodologia tem-se tornado cada vez mais importante na sociedade atual, na medida em que uma falha num produto, mesmo que rapidamente resolvida pelos serviços de assistência técnica ou totalmente coberta por termos de garantia, causa sempre insatisfação ao consumidor. Existem ainda casos em que determinados tipos de falhas num produto podem ter consequências drásticas (risco de vida) para o consumidor, nomeadamente em aviões ou equipamentos hospitalares. Deste modo, com a FMEA procura-se aumentar a fiabilidade de um determinado produto ou processo, isto é, diminuir a probabilidade deste falhar. O uso deste método está maioritariamente ligado a empresas bem estruturadas e com grande cultura de trabalho em equipa. Geralmente em empresas mais pequenas ou menos competitivas, esta ferramenta não é muito utilizada, pois a principal prioridade passa pela correção dos problemas existentes nos seus processos, de forma a atingir padrões de qualidade aceitáveis ^[47,49].



2.6.1. Tipos de FMEA

Segundo a norma QS9000 existem duas situações principais em que o método FMEA pode ser aplicado: durante a fase de conceção e desenvolvimento do projeto do produto (FMEA de produto/conceção), e durante a fase de planeamento e execução do processo (FMEA de processo), sendo que as etapas do processo de análise são praticamente as mesmas em ambos os casos, diferenciando-se apenas o objetivo e o “*timing*” em que devem ser utilizadas ^[47,49]. Durante a elaboração desta dissertação apenas se recorreu ao FMEA de processo, pelo que se fará uma análise mais detalhada apenas sobre este tipo de método. No entanto, na bibliografia recomendada pode ser consultada toda a informação relativa ao FMEA de produto/conceção ^[47-51].

2.6.1.1. FMEA de processo

A FMEA de processo é uma ferramenta dinâmica que identifica e avalia as potenciais falhas que podem ocorrer durante o planeamento e execução do processo, tendo como base as não conformidades do produto de acordo com as especificações do projeto. Nesta ferramenta todas as partes envolvidas na produção de determinado produto devem ser inspecionadas, de forma a assegurar a máxima fiabilidade e durabilidade do produto, satisfazendo assim o cliente final. Estas etapas vão desde a receção dos materiais dos fornecedores, passando pelo processo de embalagem final até ao transporte do produto final ^[48,49,51].

De acordo com a norma QS9000, esta metodologia funciona como um resumo dos pensamentos da equipa durante o desenvolvimento de um processo, incluindo uma análise de situações que poderiam falhar, baseados na experiência e problemas passados com processos semelhantes já existentes. Assim, são identificadas todas as variáveis do processo que devem ser controladas, estabelecendo um sistema de definição de prioridades para a tomada de ações corretivas. Neste caso o cliente da FMEA de processo pode ser o usuário final do produto, uma etapa do processo de produção, ou uma intervenção de assistência técnica ^[48,51].

2.6.2. Funcionamento básico da FMEA

Independentemente do tipo de FMEA (produto ou processo) e onde vai ser aplicado (produto/processo novo ou em operação), o princípio de funcionamento é sempre o mesmo e inclui cinco categorias fundamentais que devem ser sempre abordadas: Planeamento, Análise dos modos de falha potencial, Avaliação dos riscos, Ações recomendadas, Melhoria contínua. No entanto, a estrutura da FMEA deve ser adaptada à realidade de cada empresa, tendo sempre como principal objetivo a satisfação máxima do cliente ^[47,48,51,52].



2.6.2.1. Planeamento

A primeira ação a realizar nesta fase diz respeito à nomeação de um engenheiro responsável pela FMEA, o qual deve formar uma equipa que seja composta por elementos dos vários departamentos da empresa, desde a qualidade, produção ou I&D, até à assistência técnica. Nesta fase realiza-se também o planeamento das reuniões periódicas com o consentimento de todos os participantes, para trocar ideias e “*know-how*” de forma a identificar facilmente todos os potenciais modos de falha ^[47,48,51].

Após definir o objetivo do projeto, deve-se reunir toda a informação necessária que servirá de base para a elaboração da FMEA. No caso da FMEA de processo, os dados fornecidos pela FMEA de produto são bastante úteis, assim como as estatísticas de falhas no processo ou planos de inspeção ^[47,51,52].

2.6.2.2. Análise dos modos de falha potencial

Nesta fase de desenvolvimento do método de análise devem-se identificar hierarquicamente os diversos subsistemas e/ou componentes do sistema. Normalmente são elaborados diagramas ou fluxogramas do processo em questão, realçando todas as funções essenciais do sistema, com o intuito de proporcionar uma melhor visualização de potenciais riscos, como se pode visualizar na figura 2.6.1. As respostas às perguntas que se encontram nestes fluxogramas são obtidas através da discussão realizada pelo grupo de trabalho, servindo de suporte ao preenchimento das colunas do formulário FMEA. Um exemplo de um formulário FMEA pode ser encontrado na tabela A1 do anexo A ^[47,48,51,52].

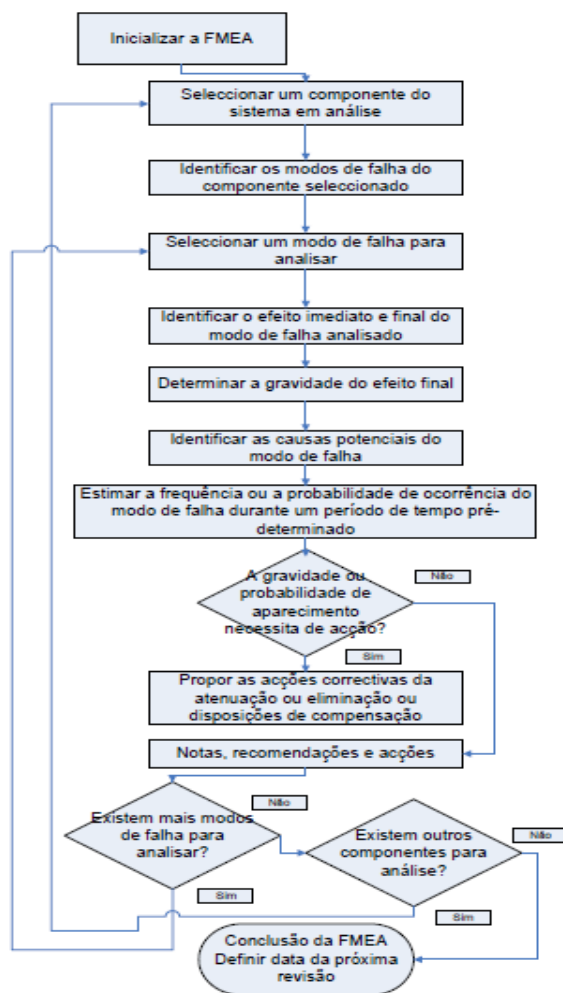


Fig. 2.6.1 – Fluxograma utilizado no preenchimento do formulário FMEA ^[47].

1. Identificação dos processos/produtos e respetivas funções: esta fase diz respeito à primeira e segunda colunas do formulário FMEA, nas quais devem ser considerados os subprocessos ou componentes que possam estar potencialmente associados a falhas, e as suas funções, respetivamente ^[47,48].

2. Definição dos modos potenciais de falha: identificadas as funções de determinado produto ou processo, define-se a forma e o modo como as suas características ou funções poderiam deixar de ser cumpridas, assumindo-se assim que determinada falha pode ocorrer, mas não vai necessariamente ocorrer ^[47,50].

3. Efeitos dos modos potenciais de falha: nesta coluna devem listar-se as formas através das quais os modos de falha afetam negativamente o desempenho do sistema, sob o ponto de vista do cliente (interno ou final). Isto é, que consequências terão no rendimento do processo/produto, na segurança e exigências regulamentares do sistema, ou no grau de descontentamento do cliente final ^[47,48].



4. Causas dos modos potenciais de falha: para cada modo de falha consideram-se as causas mais prováveis que estiveram na sua origem, interrogando-se sobre o que pode impedir que determinado subprocesso não obedeça às especificações do projeto ^[47,48].

5. Métodos de deteção e prevenção: nesta fase o grupo de trabalho identifica de que forma o operador ou o responsável pela manutenção do produto/processo deteta a ocorrência de cada modo de falha. É essencial que o método adotado na empresa seja do tipo preventivo, pois quanto mais tarde um defeito é identificado, maior será o seu impacto ^[47-49].

2.6.2.3. Avaliação dos riscos

Nesta fase (colunas 6, 8, 9 e 10 do formulário FMEA do anexo A) são avaliados quantitativamente os riscos dos modos de falha (FMECA), através da definição dos índices de gravidade (S – *Severity*), ocorrência (O – *Occurrence*) e deteção (D – *detection*), cujos critérios devem estar previamente definidos pela própria empresa ^[48,49,51].

6. Gravidade – S: o índice de gravidade consiste na apreciação do impacto negativo provocado pelo efeito de uma potencial falha no desempenho de determinado componente ou processo. Quanto à classificação da gravidade, o seu índice pode ir de 1 (gravidade nula) até 10, situação onde a segurança do utilizador pode estar em risco, como pode ser observado na tabela A2 do anexo A. Este índice tem a particularidade de só poder ser alterado através da modificação do projeto ^[47,48,52].

7. Ocorrência – O: esta variável consiste na frequência ou probabilidade de ocorrer um modo de falha. Para servir de suporte à determinação deste índice é importante recorrer a peças ou processos semelhantes já existentes, uma vez que é esperado que aconteçam grande parte dos problemas passados ^[39,40]. A avaliação deste índice também vai de 1 a 10 pontos, como pode ser visualizado na tabela A3 do anexo A ^[47,49,50].

8. Deteção – D: consiste na avaliação da probabilidade de deteção de um determinado modo de falha, baseando-se nos métodos de controlo de qualidade implementados pela empresa. Neste caso o índice é avaliado na ordem inversa das anteriores, uma vez que quanto mais elevado é o seu número, menos provável é a sua deteção, como pode ser verificado na tabela A4 do anexo A ^[47,48].

9. Número de Risco de Prioridade – RPN: este número é calculado pelo produto dos 3 índices anteriores (G, O, D), com o principal objetivo de se estabelecer as prioridades de eliminação dos modos de falha. Na maior parte das empresas, situações que apresentem um índice de risco superior a 150 são consideradas prioritárias, porém como a atribuição



dos valores é subjetiva, fica ao critério da empresa estabelecer o seu próprio limite de risco ^[47,48,49].

2.6.2.4. Ações recomendadas

Dentro desta categoria (coluna 11 da tabela A1 do Anexo A) o grupo, através dos seus conhecimentos e experiência, elabora uma lista de todas as ações corretivas e preventivas que devem ser realizadas, com o principal objetivo de reduzir o RPN ^[47,48,49]. Estas são avaliadas quanto à sua viabilidade, contrabalançando-se os gastos e tempo dispendido na sua implementação e, através do formulário FMEA são definidos os responsáveis pela ação, os prazos e, por último, são apresentados os novos valores de O e D. Através desta nova avaliação de riscos (RPN final) é verificado se a medida adotada foi bem-sucedida ^[47,48,51].

2.6.2.5. Melhoria contínua

Esta última etapa não faz parte do formulário FMEA, servindo apenas para demonstrar a utilidade do método e importância de estar em constante atualização. Mesmo depois do processo ou da conceção do produto estarem estáveis, o formulário FMEA é um documento “vivo”, isto é, deve ser frequentemente revisto, analisado e reavaliado, como por exemplo, com a incorporação de falhas não previstas inicialmente, ou com base em dados obtidos para as falhas já antecipadas ^[48,51].





3. METODOLOGIA

Nesta tese estudou-se a relação que existe entre o desempenho de um revestimento de PTFE (Greblon[®]) e a qualidade do tratamento prévio da superfície que serve de suporte a esse revestimento. Através do método de análise FMEA identificaram-se os problemas atuais e potenciais modos de falha do processo, definindo-se um conjunto de ações que deveriam ser tomadas de forma a eliminar ou mitigar a ocorrência de outros problemas.

Assim sendo, realizaram-se vários testes com o principal objetivo de avaliar a influência de alguns fatores na capacidade de adesão do revestimento ao substrato, tais como:

- A concentração de desengordurante (Novaspray AL1) no tanque de desengorduramento;
- A concentração de decapante (N-Kleen Etch) no tanque de decapagem.

3.1. PLACAS DE ALUMÍNIO ESTAMPADAS

O alumínio utilizado na produção de placas estampadas chega à empresa em rolos de aproximadamente 23500Kg, provenientes da empresa italiana Novelis, com espessura de 1,800mm e 335,0mm de largura. A sua composição baseia-se em alumínio, silício, ferro, cobre, magnésio, cromo, zinco, titânio e manganês. Para as placas de alumínio corresponderem às especificações pretendidas pela empresa, passam por um processo que envolve duas operações: prensagem e estampagem. Durante todo este processo é aplicado, através de aspersão, um óleo integral (RENOFORM UBO 377/19), não miscível em água, sintético, à base de hidrocarbonetos.

Para se poder realizar os testes de qualidade pretendidos, segundo as normas ISO 2409:2007 e NP EN ISO 2360:2005 é fundamental que a superfície do sistema a ser analisada fosse completamente lisa, isto é, livre de imperfeições. Para isso, as placas não foram sujeitas ao processo de estampagem, sendo obtidas apenas por prensagem com dimensões de 320x220mm. Para a realização das medições dos ângulos de contacto foram ainda cortadas placas menores, com as dimensões de 50x50mm.

3.2. PROCESSO DE TRATAMENTO DAS PLACAS DE ALUMÍNIO

Quando se pretende revestir um determinado substrato, particularmente com uma tinta, é fundamental que a sua superfície seja previamente tratada. O desempenho de um revestimento está relacionado com a sua capacidade de adesão ao substrato, que pode ser maximizado através da remoção de gorduras, óxidos ou outras sujidades da superfície. Atualmente na empresa, o processo de tratamento da superfície de placas de alumínio envolve 9 etapas:

desengorduramento, quatro lavagens com água, duas decapagens, uma secagem à temperatura ambiente e uma secagem em estufa, como é descrito na sequência da figura 3.2.1. Na tabela B1 do anexo B encontram-se os tempos das várias etapas identificadas na figura.

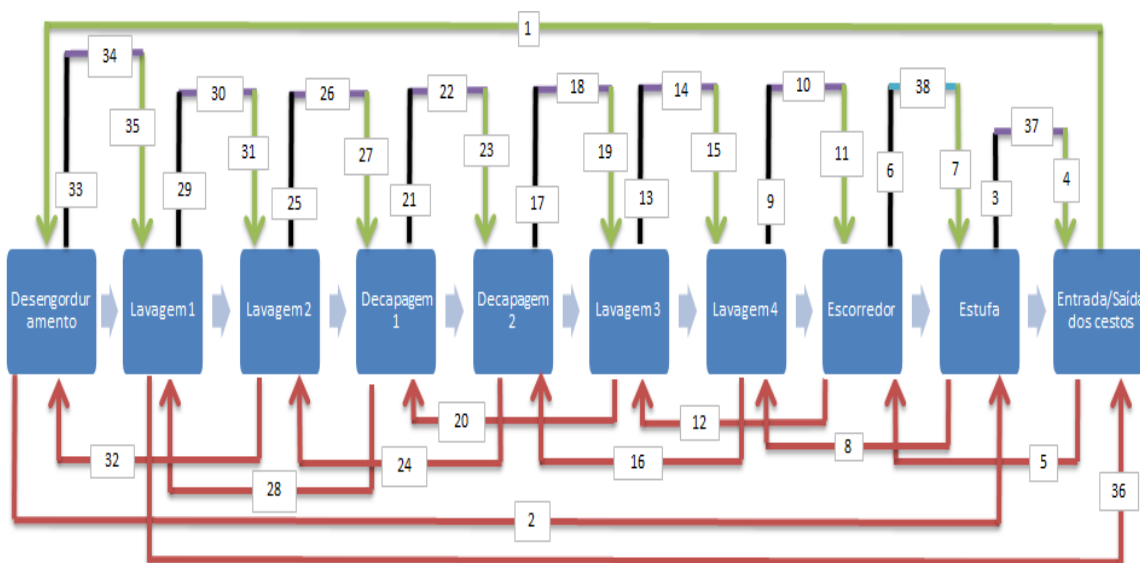


Fig. 3.2.1 - Representação sequencial das várias fases do processo de tratamento da superfície das placas alumínio, na empresa FLAMA S.A.

As condições de processamento e os produtos utilizados durante o tratamento da superfície das placas de alumínio são apresentados de modo sucinto na tabela 3.2.1.

Tabela 3.2.1 – Componentes e condições utilizados em cada fase do processo de lavagem das placas de alumínio.

Fase do Processo	Condições	Componentes
Desengorduramento	Aspersão em tanque de 1000L	- <u>Desengordurante</u> : Novaspray AL1; - <u>Aditivo</u> : Synergic CZ; - Água corrente à temperatura de 72 ±2°C.
Lavagem com água	Imersão em 4 tanques de 450L	- Água corrente à temperatura ambiente.
Decapagem	Imersão em 2 tanques de 450L	- <u>Decapante</u> : N-Kleen Etch; - Água corrente à temperatura ambiente.
Escorredor	Secagem em tanque vazio	- Temperatura ambiente;
Estufa	Evaporação dos resíduos em tanque fechado	- Temperatura dentro do tanque: ▪ <u>Outono/Inverno</u> : 90 ±5°C ▪ <u>Primavera/Verão</u> : 80 ±5°C

3.3. PROCESSO DE APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO ANTIADERENTE

Após as placas serem devidamente tratadas pelo processo anterior, seguem para a linha de pintura de antiaderentes onde vão ser revestidas e submetidas a determinadas condições, com o principal objetivo de obter um revestimento perfeitamente homogêneo. Atualmente, o processo de pintura e processamento de antiaderentes da empresa engloba 7 etapas: pré-aquecimento das placas, pintura automática, pintura manual, secagem com ar quente e evaporação do solvente em três fornos, seguindo a sequência ilustrada na figura 3.3.1.

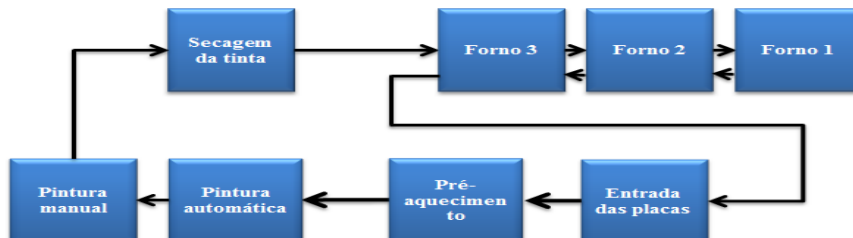


Fig. 3.3.1 – Representação esquemática das várias etapas do processo de pintura de antiaderentes da empresa FLAMA S.A.

As condições utilizadas ou parâmetros do processo de pintura encontram-se na tabela 3.3.1.

Tabela 3.3.1 – Fases do processo de pintura de antiaderentes e condições utilizadas.

Fase do Processo	Parâmetros do processo de pintura	
Pré-aquecimento das placas	- Temperatura final das placas: $33 \pm 3^{\circ}\text{C}$ - Tempo de pré-aquecimento: $\approx 40\text{s}$	
Pintura automática	- Amplitude do Robot: $\approx 18\text{cm}$ - Distância Robot-Placa: 20cm - Pressão, ar da pistola: $\approx 2,1\text{bar}$ - Tempo de pintura (por placa): $\approx 9\text{s}$	- <u>Tinta</u> : Greblon® - <i>Non-stick coating</i> - <u>Diluyente</u> : <i>Verdünnung</i>
Pintura manual	- Intensidade corrente: $22 \pm 13\mu\text{A}$ - Diferença de Potencial: $10 \pm 5\text{kV}$ - Pressão, ar da pistola: $2,1 \pm 4\text{bar}$ - Tempo de pintura (por placa): $10 \pm 2\text{s}$	- <u>Viscosidade da tinta</u> : $32 \pm 3\text{s}/4\text{mm}/23^{\circ}\text{C}/\text{ASTM D 365}$ - <u>Pressão, tanque</u> : $1,6 \pm 6\text{bar}$ e $2,5 \pm 6\text{bar}$
Secagem	- Temperatura de secagem: $140 \pm 10^{\circ}\text{C}$ - Tempo de secagem: $\approx 6,5\text{min}$	
Evaporação do solvente	- Temperatura de cozimento: <ul style="list-style-type: none"> Forno 1: $415 \pm 5^{\circ}\text{C}$ Forno 2: $400 \pm 5^{\circ}\text{C}$ Forno 3: $415 \pm 5^{\circ}\text{C}$ - Tempo de cozimento: $\approx 11\text{min}$	



3.4. MÉTODO DE CONTROLO ANALÍTICO DOS BANHOS DE DESENGORDURAMENTO

Através da FMEA verificou-se que não existia, por parte da empresa, um controlo eficiente da concentração do banho de desengorduramento, uma vez que os resultados obtidos pelo método de controlo nunca correspondiam ao esperado. Sendo assim, solicitou-se à empresa que nos fornece os produtos utilizados no desengorduramento (Henkel), que facultasse toda a informação existente relativa a estes produtos, nomeadamente fichas técnicas dos produtos e/ou outras informações relevantes para o processo.

Após análise de toda a informação relativa aos produtos utilizados no desengorduramento, adotou-se o procedimento de controlo analítico dos banhos, sugerido pela Henkel. A concentração de Novaspray AL 1 foi determinada através da titulação de 10ml do banho com NaOH 0,1N, adicionando-se 3 a 4 gotas de indicador fenolftaleína à amostra. Após ser obtida a coloração rosa, determinou-se analiticamente a concentração do banho através da relação descrita pela equação 3.1.

$$\text{Conc. Novaspray} \left[\frac{\text{mL}}{\text{L}} \right] = 3,50 \times \text{Volume gasto em mL de NaOH 0,1N} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Uma vez determinado o valor da concentração do banho, verificou-se se este se encontrava dentro dos limites estabelecidos pela ficha técnica do produto, na qual a concentração de Novaspray AL 1 deveria estar compreendida entre 5,00 e 40,0 g/l para a garantir um bom desengorduramento das placas de alumínio. Relativamente ao aditivo (Synergic CZ), segundo a informação fornecida pela Henkel, a sua concentração nunca deveria exceder os 10% da concentração de desengordurante. Porém, verificou-se que a quantidade de Synergic CZ presente em solução, não tem qualquer influência no valor da concentração do banho de desengorduramento.

Se a concentração calculada estiver fora do valor pretendido, a quantidade de produto a adicionar é calculada pela relação descrita pela equação 3.2.

$$V_{\text{Novaspray, adicionar}} [\text{L}] = \frac{(\text{Conc. Novaspray, inicial} - \text{Conc. Novaspray, calculada}) \times V_{\text{tanque}}}{1000} \quad (\text{Eq. 3.2})$$



3.5. MÉTODO DE CONTROLO ANALÍTICO DOS BANHOS DE DECAPAGEM

No que diz respeito à decapagem, através da análise FMEA verificou-se que não existia um controlo diário da concentração de decapante pela empresa. Porém, para este caso não foi necessário estabelecer um procedimento de controlo da concentração dos banhos de decapagem, uma vez que já existia um procedimento na empresa que permitia controlar a concentração de N-Kleen Etch.

Para determinar a concentração de decapante, preparou-se uma amostra com 10ml do banho de decapagem, à qual se adicionou 3 a 4 gotas de azul de bromofenol. Realizou-se a titulação da amostra com NaOH 1N (titulante) até que a amostra obtivesse coloração azulada. Neste instante foi determinada analiticamente a concentração do banho de N-Kleen Etch através da equação 3.3.

$$\text{Conc.}_{\text{N-Kleen Etch}} \% \left(\frac{V}{V} \right) = 2,1 \times \text{Volume gasto de NaOH 1N} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Segundo a ficha técnica do produto, para garantir que a superfície fique completamente livre de contaminantes sólidos (lamas ou produtos de corrosão), é essencial que a concentração de decapante esteja compreendida entre 5,0% e 10% (V/V). Uma vez que na empresa existem dois banhos de decapagem sucessivos, foi sugerido pela Henkel que se trabalhasse em cada tanque com concentrações na gama dos 2,5-5,0% (V/V), havendo assim uma poupança de decapante sem prejuízo para o produto final.

No caso da concentração verificada estar fora do valor pretendido, o volume de produto a adicionar é calculado através da relação descrita pela equação 3.4.

$$V_{\text{N-Kleen Etch}} [\text{L}] = \frac{(\text{Conc.}_{\text{N-Kleen Etch, inicial}} - \text{Conc.}_{\text{N-Kleen Etch, calculada}}) \times V_{\text{tanque}}}{100} \quad (\text{Eq. 3.4})$$



3.6. EFICIÊNCIA DA LAVAGEM EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE E DECAPANTE

Ainda através da análise FMEA, constatou-se ser fundamental definir um valor ótimo, quer para a concentração do banho de desengorduramento, quer para a dos banhos de decapagem, não só com o objetivo de se conseguir uma poupança de produto, mas principalmente para garantir que as placas de alumínio ficassem completamente livres de contaminantes. Desta forma, numa primeira fase começou-se por avaliar a influência da concentração dos banhos na perda de massa (ou grau de lavagem) das placas de alumínio. Para isso, dividiu-se a gama de concentrações de desengordurante em dois intervalos, tal como é apresentado na tabela 2, um onde as concentrações eram mínimas (a azul), e outro onde eram máximas (a branco). Dentro de cada intervalo, testou-se ainda o efeito da concentração de decapante através da combinação de diferentes valores em cada uma das etapas (1º e 2º banhos de decapagem).

Tabela 3.6.1 – Diferentes combinações de concentrações de desengordurante e decapante utilizadas nos vários ensaios realizados.

Conc. Deseng. (mL/L)	Conc. 1ª Dec. % (V/V)	Conc. 2ª Dec. % (V/V)
Mínima ($\approx 4,00 \text{ mL/L} \leq \text{Conc. Deseng.} \leq \approx 26,0 \text{ mL/L}$)	2,5	2,5
	2,5	3,5
	2,5	5,0
	3,5	5,0
	5,0	5,0
	5,0	3,5
	5,0	2,5
	3,5	2,5
	3,5	3,5
Máxima ($\approx 26,0 \text{ mL/L} \leq \text{Conc. Deseng.} \leq \approx 39,0 \text{ mL/L}$)	2,5	2,5
	2,5	3,5
	2,5	5,0
	3,5	5,0
	5,0	5,0
	5,0	3,5
	5,0	2,5
	3,5	2,5
	3,5	3,5

As placas, antes de serem lavadas, e após terem sido sujeitas a estas condições, foram pesadas com o auxílio de uma balança de precisão da marca Kern®, com capacidade para 100g e com precisão de 2 casas decimais. Através da diferença entre o peso inicial e o peso final das placas, dividido pela sua área, obteve-se a perda de massa das placas, como mostra a equação 3.5.

$$\text{perda de massa (grau de lavagem)} \left[\frac{g}{m^2} \right] = \frac{m_{\text{inicial, placas}} - m_{\text{final, placas}}}{A_{\text{placa}}} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

3.7. MEDIÇÃO/MONITORIZAÇÃO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO

De seguida procedeu-se de forma análoga ao caso anterior, com o objetivo de avaliar o efeito da concentração de desengordurante e de decapante na espessura do revestimento de Greblon. As placas, após serem tratadas nas condições descritas na tabela 3.6.1, foram revestidas através do processo descrito na secção 3 deste capítulo. Segundo a ficha técnica do produto (Greblon® - Non-stick coating), a espessura do revestimento seco deveria estar compreendida entre 14,0 e 20,0µm. O controlo da espessura foi realizado com um perfilómetro da marca *Elcometer*, modelo A456 CFNFTS com sonda (NS - MF22846), com controlo numa faixa de 0 a 1500µm e com precisão de ±2,5µm.

Uma vez que as placas passavam por um processo de pintura automática, um de pintura manual e, em alguns casos específicos por um de repintura, avaliou-se também qual o efeito que estas situações tinham na espessura do revestimento. Para isso, escolheram-se diferentes zonas da placa, como mostra a figura 3.7.1.

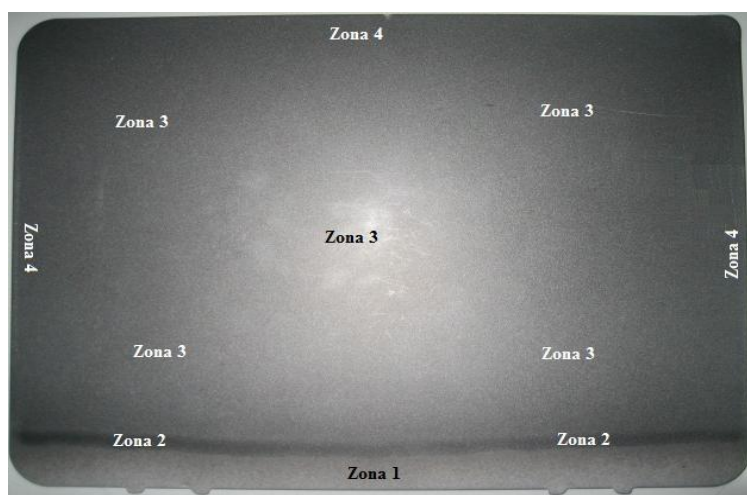


Fig. 3.7.1 – Exemplo de uma placa utilizada nos vários ensaios, onde são identificadas as diferentes zonas que foram submetidas ao controlo da espessura do revestimento.

As quatro zonas identificadas na figura 3.7.1 dizem respeito ao local da placa: onde a pintura automática não consegue chegar (zona 1); onde se observa uma acumulação de tinta em todas as placas revestidas (zona 2); onde não ocorre praticamente qualquer tipo de pintura manual (zona 3); e finalmente, onde se observou que a aplicação do revestimento por ação manual era muito acentuada (zona 4). Para avaliar a influência da concentração dos banhos na espessura do revestimento, limitámo-nos a utilizar apenas os dados da zona 3, uma vez que neste local não existia praticamente qualquer tipo de aplicação da tinta por ação manual.



3.8. CONTROLO DAS ÁGUAS DE LAVAGEM

No que toca à qualidade das águas dos tanques de lavagem, uma vez que não existia qualquer controlo por parte da empresa, optou-se por verificar diariamente o pH destas águas. As medições do pH foram realizadas com a ajuda de um medidor de pH de bolso da marca Hanna Instruments, modelo HI 98127, que permite realizar leituras na gama de pH entre 0 e 14 com um erro de aproximadamente ± 0.1 pH. O pH foi medido duas vezes por dia (no início e no final do dia) nos quatro tanques de lavagem com água.

3.9. TESTE DA QUADRÍCULA

A avaliação da resistência do revestimento à separação do metal, isto é, o grau de adesão da película de revestimento foi realizada através dos testes da quadrícula. Para tal fez-se incidir um aparelho “*multi-blade cutting tool*” sobre a superfície em análise. As incisões foram realizadas segundo a Norma para este teste (ISO 2409:2007), isto é, foram executados 12 cortes perpendiculares entre si, espaçados de 1mm entre si. Esta ação foi repetida três vezes ao longo da placa livre de distorções, espaçadas entre si de aproximadamente 5mm. De seguida, aplicou-se a fita adesiva da marca Tesa® 4024, com capacidade de adesão de 3N/cm (de acordo com o estipulado pela Norma), progressivamente sobre a quadrícula numa direção paralela às incisões. Após ser assegurado um bom contacto entre a fita e o revestimento, passados aproximadamente 5 minutos, removeu-se a fita com um gesto rápido e contínuo, tendo-se repetido este procedimento duas vezes para a mesma quadrícula. Após remoção da fita avaliaram-se os resultados obtidos de acordo com a tabela 3.9.1.

Tabela 3.9.1 – Classificação dos resultados do teste da quadrícula.

Classificação	Descrição	Aspeto da quadrícula
0	Os bordos das incisões são perfeitamente lisos; nenhum dos quadrados se destacou.	-
1	Destacamento de pequenas faixas do revestimento nas intersecções das incisões que não afeta mais de 5% da quadrícula.	
2	O revestimento destacou-se ao longo dos bordos das intersecções das incisões, afetando nitidamente entre 5 a 15% da quadrícula.	
3	O revestimento destacou-se ao longo dos bordos das incisões, em parte ou na totalidade, em largas faixas, ou destacou-se em parte ou na totalidade em diversas zonas das quadrículas, afetando nitidamente entre 15 a 35% da quadrícula.	
4	O revestimento destacou-se ao longo dos bordos das incisões em largas faixas, ou alguns quadrados destacaram-se em parte ou na totalidade afetando	

	nitidamente entre 35 e 65% da quadrícula.	
5	Todos os graus de destacamento que não podem ser classificados até à classe 4.	-

Após a execução deste teste, realizou-se um outro complementar sugerido à FLAMA S.A. pela conceituada empresa Philips. Neste, fizeram-se imergir as amostras num recipiente com água desmineralizada em ebulição, durante aproximadamente 15 minutos. De seguida, mergulharam-se as amostras em água corrente (fria), deixando-as secar à temperatura ambiente. Após a superfície estar perfeitamente seca, voltou-se a realizar o procedimento descrito anteriormente, avaliando-se novamente o resultado do teste da quadrícula através tabela 3.9.1.

3.10. MEDIÇÕES DE ÂNGULOS DE CONTACTO

Finalmente procedeu-se às medições dos ângulos de contacto formados entre o substrato e a água, utilizando para isso um medidor de ângulos de contacto ótico, dataphysics OCA 20, existente no Departamento de Química da Universidade de Aveiro. Este medidor, através dum sistema de vídeo combinado com um computador, fornece a imagem da gota formada na superfície do substrato, calculando os ângulos de contacto formados quer à esquerda quer à direita da gota, assim como os parâmetros da respetiva gota (volume, tensão, etc.). Na figura 3.10.1 mostra-se o medidor de ângulos de contacto utilizado (figura a), assim como o aspeto da gota que o sistema de vídeo regista através do computador (figura b).

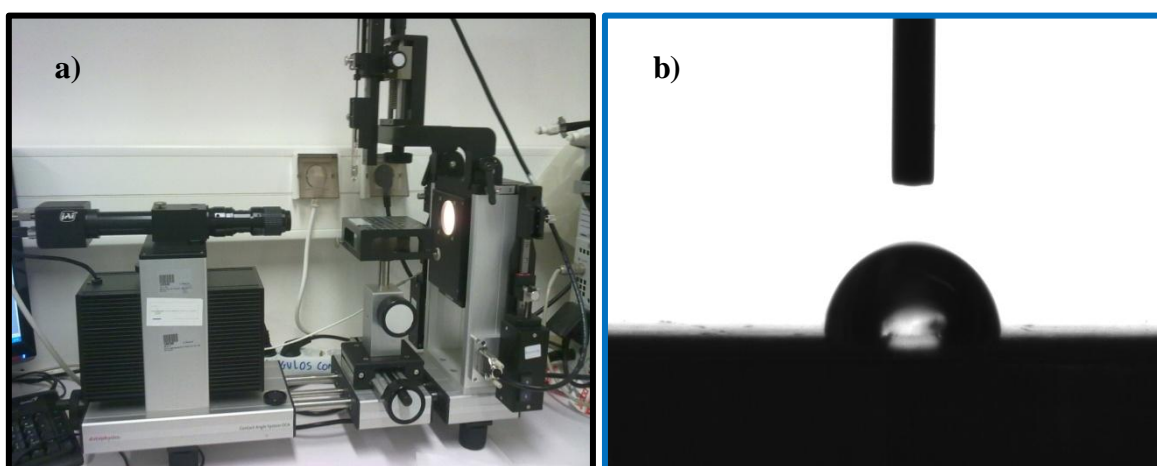


Fig. 3.10.1 – a) Medidor de Ângulos de contacto dataphysics OCA 20, utilizado neste estudo; b) Imagem da gota fornecida através do sistema de vídeo combinado com o computador.





4. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Como foi discutido no capítulo 2, a superfície do alumínio, apesar de apresentar excelentes propriedades mecânicas e térmicas, é pouco rugosa e é constituída por uma película de composição química heterogénea que impedem que a interação substrato-revestimento possua a resistência e durabilidade desejada. Na empresa utiliza-se um conjunto de operações, onde se destacam o desengorduramento e a decapagem, com o principal objetivo de garantir que não ocorram quaisquer falhas na adesão, homogeneidade e durabilidade do revestimento de PTFE.

Após a identificação de um conjunto de potenciais modos de falha do processo (através da análise FMEA), neste capítulo procurou-se compreender e avaliar as suas causas e consequências. Para tal, avaliou-se o efeito da concentração dos banhos de desengorduramento e de decapagem em diversos fatores, nomeadamente: perda de massa (grau de lavagem), espessura do revestimento de Greblon, teste da quadrícula e ângulo de contacto. Além disso, foram realizados estudos complementares onde se pretendeu verificar a evolução do pH das águas de lavagem, o efeito do aumento do potencial elétrico na espessura do revestimento, e a possibilidade de utilizar placas sem serem sujeitas a qualquer tipo de tratamento. Tendo em conta o vasto número de testes realizados (>1000), optou-se por agrupar os resultados mais representativos relativos aos testes da perda de massa, da espessura ou da quadrícula e, dentro de cada conjunto de resultados obtidos compilaram-se os resultados sob a forma de gráficos de barras, que serão discutidos nos subcapítulos seguintes.

4.1. EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE E DECAPANTE NO GRAU DE LAVAGEM

Neste subcapítulo avaliou-se a perda de massa, ou grau de lavagem, das placas de alumínio em função da concentração de desengordurante e decapante. Através da análise FMEA verificou-se que existia um sério problema no controlo da concentração do banho de desengorduramento, uma vez que os valores obtidos pela fórmula de cálculo fornecida pelo fornecedor do produto, Henkel, eram completamente disparatados. Isto é, quando se preparava uma solução com uma concentração específica, após algumas horas de trabalho verificava-se que a concentração em vez de ter diminuído, tinha aumentado significativamente. Por esse motivo todos os detalhes do procedimento utilizado pela empresa foram analisados, tendo-se identificado que o coeficiente apresentado na ficha técnica do desengordurante (Novaspray AL1) estava errado, isto é, o fator de multiplicação apresentado era igual a 5,3 quando na realidade se verificou que este deveria ser de 3,5. O caso foi apresentado à Henkel, que após ter analisado toda esta situação, emitiu uma nova ficha técnica do produto com o coeficiente

alterado para o valor que se tinha determinado, como se pode visualizar no anexo C desta dissertação.

No momento em que se iniciou o controlo analítico dos banhos, a concentração de desengordurante era aproximadamente 39,0mL/L, ou seja, superior ao máximo permitido pela ficha técnica do produto “Novaspray AL1”. Esta situação levou-nos a atuar imediatamente sobre este subprocesso, uma vez que existiam fortes indícios de estar a haver um consumo de produto excessivo. Relativamente à concentração dos banhos de decapagem, verificou-se que os seus valores estavam frequentemente no limite mínimo estabelecido pela Henkel (2,5%). Neste caso, considerou-se importante avaliar o efeito do aumento da concentração de N-Kleen Etch na perda de massa das placas de alumínio.

Começou-se então por avaliar a variação da concentração de desengordurante (fixando a concentração dos banhos de decapagem no valor mínimo) ao longo do tempo, como mostra a figura 4.1.1.

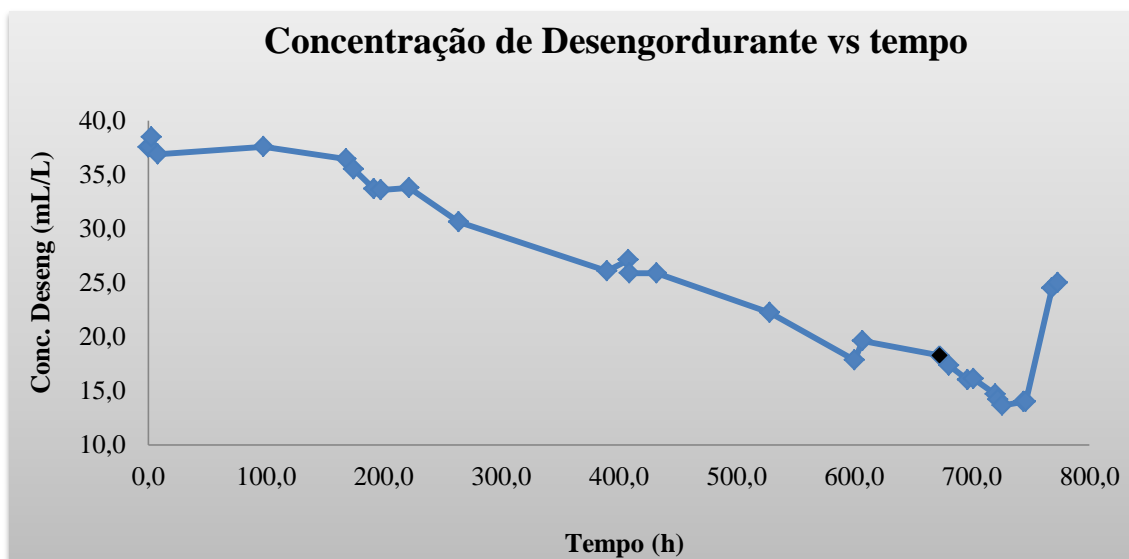


Fig. 4.1.1 – Evolução da concentração de desengordurante em função do tempo, fixando a concentração do primeiro e segundo tanque de decapante no valor mínimo; o ponto a preto diz respeito ao caso em que o sistema começou a apresentar grande instabilidade (18,3 mL/L).

Ao reduzir-se a concentração de desengordurante constatou-se que, para valores inferiores a 18,3mL/L, o sistema começava a apresentar grande instabilidade, isto é, os tanques posteriores ao desengorduramento ficavam rapidamente com muitos resíduos superficiais e as placas de alumínio apresentavam alguns contaminantes na sua superfície. Além disso, quando se pretendia trabalhar com concentrações de decapante mais elevadas, verificou-se que era praticamente impossível, uma vez que a concentração de decapante rapidamente diminuía. Finalmente, quando se aplicou o revestimento de Greblon nestas placas, verificou-se que a película formada não era perfeitamente homogénea, apresentando inclusivamente sinais de descascamento. Por esta razão, muitas das placas voltaram a ser novamente pintadas para que se

conseguisse um revestimento o mais homogéneo possível. Esta situação, como será demonstrado ainda no decorrer deste capítulo, teve um efeito prejudicial não só ao nível da espessura do revestimento, como também no resultado do teste da quadrícula para as placas “repintadas”. Assim sendo, fixou-se a concentração de 18,3mL/L, como a concentração mínima admissível para o banho de desengorduramento.

Como era expectável, através da análise dos ensaios realizados nas condições anteriores, não foi possível retirar qualquer conclusão sobre o efeito da concentração de desengordurante na perda de massa das placas, uma vez que os resultados obtidos não seguiam qualquer tendência, como se pode visualizar na figura 4.1.2 (a vermelho). Na mesma figura são ainda identificados outros ensaios que, por outras situações de anormalidade (serão explicadas no decorrer desta discussão), foram também excluídos da discussão desta tese (a azul).

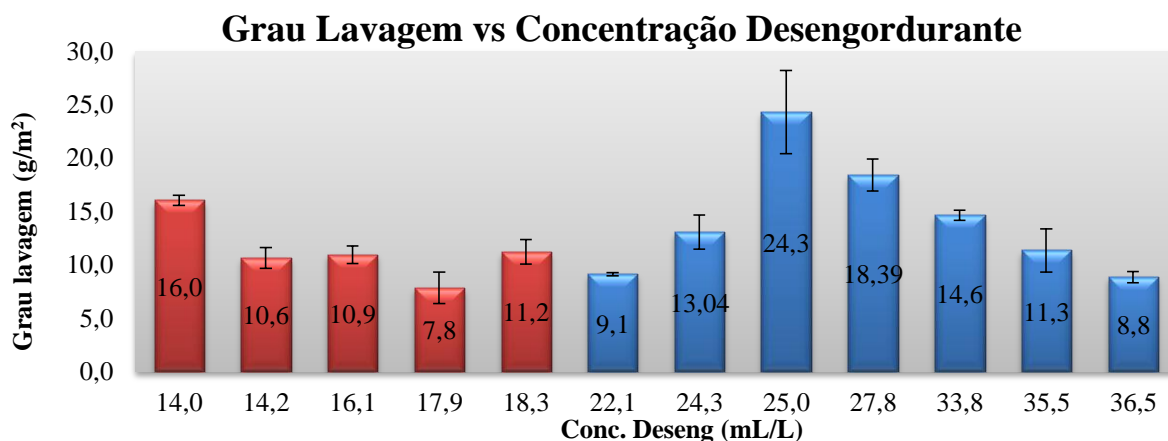


Fig. 4.1.2 – Evolução do grau de lavagem em função da concentração de desengordurante para os ensaios em que se verificou alguma anormalidade do sistema. As barras de erro apresentadas correspondem aos desvios padrão obtidos no cálculo do grau de lavagem, em cada ensaio.

A figura 4.1.2 pode ser dividida em dois intervalos de concentrações de desengordurante (distinguidas por cores), isto é, de 14,0 a 18,3mL/L, e de 22,1 a 36,5mL/L. Como já foi referido, o primeiro intervalo (a vermelho) diz respeito aos resultados obtidos nas condições anteriormente descritas. Através da análise dos mesmos, verifica-se que o aumento da concentração de desengordurante provoca efeitos díspares no grau de lavagem das placas de alumínio. Isto é, inicialmente ao reduzir-se a concentração do banho de 18,3mL/L para 17,9mL/L verifica-se que a perda de massa das placas diminui. Contudo, para valores ainda mais reduzidos de concentração verifica-se exatamente o oposto, ou seja, a perda de massa destes ensaios é significativamente maior, como por exemplo para 14,0mL/L. Tendo em conta que estes ensaios foram realizados em condições de grande instabilidade do sistema, optou-se por excluí-los da discussão, para que não conduzissem a conclusões erradas.

O segundo intervalo (a azul), diz respeito aos casos em que se pretendia trabalhar com uma determinada concentração de decapante, no entanto, uma hora após a adição de um

determinado volume de produto, verificou-se uma diferença muito significativa nesse valor. Por exemplo, existiram casos em que se pretendia que a concentração de decapante fosse máxima (5,0% V/V). Porém, após uma hora de se ter adicionado a quantidade de produto pretendida (calculada pela equação 3.4 do capítulo 3), verificou-se que a concentração era consideravelmente mais baixa. Desta forma, também se optou por não considerar estes ensaios na discussão, uma vez não existir certeza sobre as condições a que as placas foram submetidas.

De seguida, fixou-se a concentração de desengordurante dentro da gama mínima ($18,3\text{mL/L} < \text{Conc. Desengordurante} \leq 25,6\text{mL/L}$), variando a concentração dos dois tanques de decapagem simultaneamente, como mostra a figura 4.1.3 a). Procurou-se que a concentração de decapante assumisse três valores distintos, um valor mínimo (2,5% V/V), um valor intermédio (3,5% V/V) e finalmente um máximo (5,0% V/V). Procedeu-se de forma análoga, mas para a faixa de valores máximos da concentração de desengordurante ($25,6\text{mL/L} < \text{Conc. Desengordurante} \leq 39,2\text{mL/L}$), como é apresentado na figura 4.1.3 b) (a cinzento).

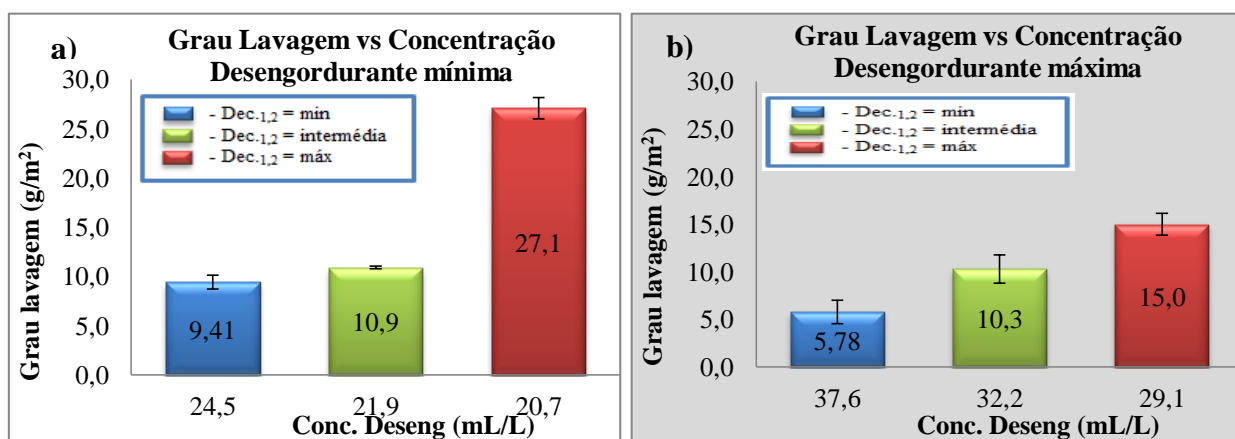


Fig. 4.1.3 – Evolução do grau de lavagem em função da concentração de desengordurante: a) mínima e b) máxima, para os casos em que se alterou as duas decapagens simultaneamente. As barras de erro apresentadas correspondem aos desvios padrão obtidos no cálculo do grau de lavagem, em cada ensaio.

No que diz respeito ao efeito da concentração de desengordurante sobre o grau de lavagem das placas de alumínio, ao comparar-se os dois casos da figura 4.1.3 (a branco e a cinzento), observa-se que o aumento da concentração de desengordurante conduz a uma diminuição da perda de massa das placas. Relativamente aos ensaios em que as concentrações de decapante eram 2,5% e 3,5% (azul e verde), a diferença entre a perda de massa das placas tratadas em condições mínimas e máximas de desengorduramento, é pouco significativa. No entanto, os resultados dos ensaios em que a concentração de decapante era máxima (vermelho), a diferença entre a perda de massa em ambos os casos é muito acentuada. Por estas razões, pensa-se que quando se trabalha com concentrações de desengordurante mínimas (20,7 mL/L), e concentrações de decapante máximas (5,0%), além de ocorrer a remoção dos contaminantes da

superfície da placa, existe também um ataque severo ao próprio alumínio por parte do ácido, o que é bastante prejudicial para a resistência e durabilidade do substrato. Como sugestão seria importante avaliar o ângulo contacto desta superfície e também a sua rugosidade.

Observando os dois casos da figura 4.1.3, pode-se afirmar que o aumento da concentração nos dois banhos de decapagem levou ao aumento da perda de massa das placas. Através da análise da figura a), na gama de concentrações de desengordurante mínima verifica-se que o aumento da concentração de decapante do seu valor mínimo (azul) para o intermédio (verde), tem uma influência mínima na perda de massa das amostras. Porém, quando se aumenta essa mesma concentração para o máximo permitido (vermelho), é notório que o ataque do ácido às placas se torna mais acentuado. Relativamente à figura b), esta tem um comportamento semelhante ao da a), contudo quando se compara a perda de massa registada nos ensaios em que a concentração de decapante foi mínima e intermédia (azul e verde), com a perda de massa registada no ensaio em que foi máxima (vermelho), observa-se que a diferença entre ambos já não é tão significativa como era na figura a). Porém o aumento da concentração do decapante de mínima para intermédia parece ter uma maior influência sobre o grau de lavagem do que aquela que foi observada para as placas estudadas utilizando a concentração mínima de desengordurante.

Numa segunda fase, voltou-se a avaliar, de forma similar, a influência da concentração dos banhos no grau de lavagem, mas variando apenas a concentração de um dos tanques de decapagem. A figura 4.1.4 mostra a evolução da perda de massa das placas para o caso em que se fixou a concentração do primeiro banho de decapagem, no seu valor mínimo (2,5% V/V), e se variou a concentração de decapante no segundo tanque, desde o valor mínimo (2,5% V/V) até ao máximo admitido (5,0% V/V). Por sua vez, na figura 4.1.5, apresentam-se os resultados deste estudo para a situação contrária, ou seja, quando se fixou a concentração do segundo tanque de decapagem e se variou a concentração do primeiro tanque de decapagem.

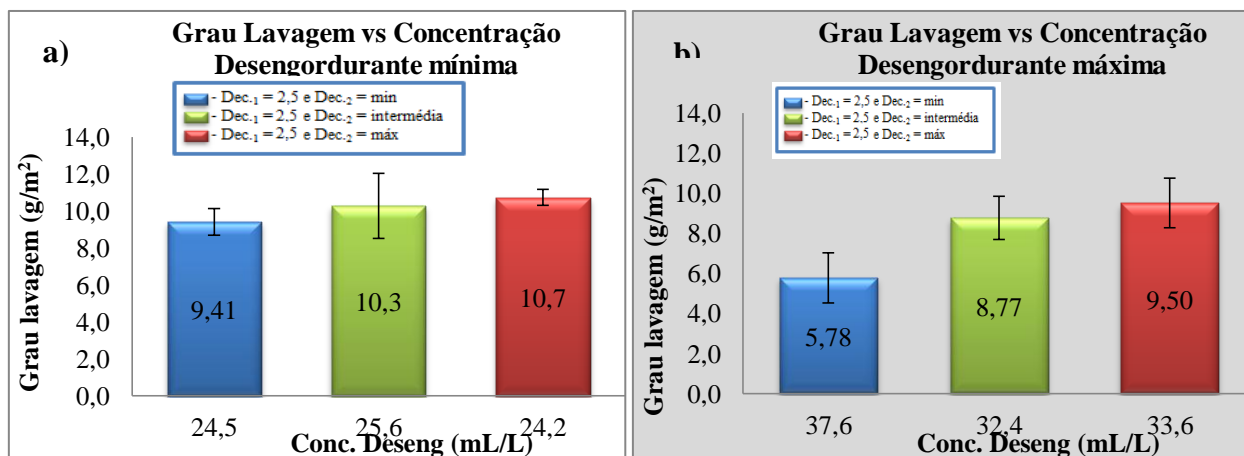


Fig. 4.1.4 – Evolução do grau de lavagem em função da concentração de desengordurante: a) mínima e b) máxima, para os casos em que se fixou a concentração do primeiro tanque de decapagem no valor mínimo (2,5%), variando a

concentração do segundo tanque de decapagem. As barras de erro apresentadas correspondem aos desvios padrão obtidos no cálculo do grau de lavagem, em cada ensaio.

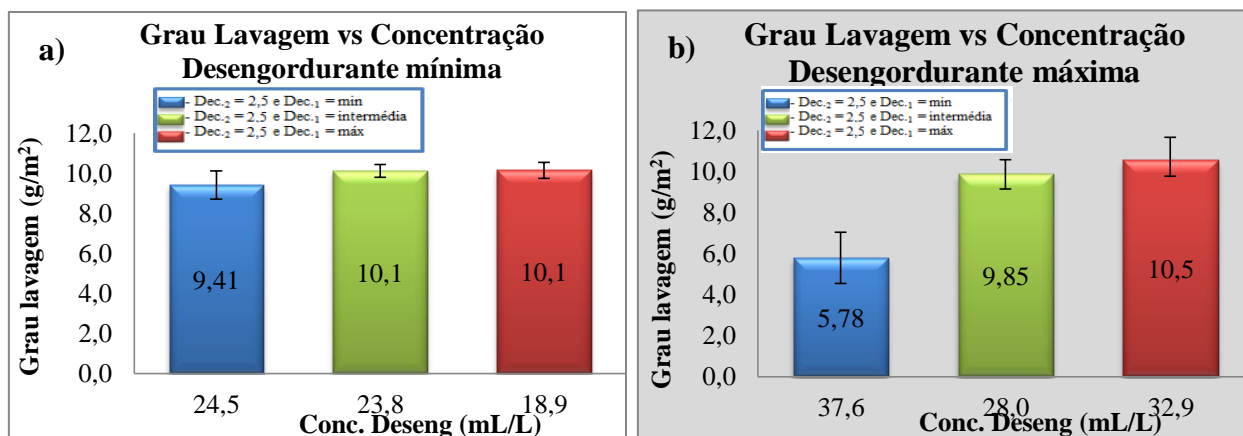


Fig. 4.1.5 – Evolução do grau de lavagem em função da concentração de desengordurante: a) mínima e b) máxima, para os casos em que se fixou a concentração do segundo tanque de decapagem (2,5%), variando a concentração do primeiro tanque de decapagem. As barras de erro apresentadas correspondem aos desvios padrão obtidos no cálculo do grau de lavagem, em cada ensaio.

Analisando as figuras 4.1.4 e 4.1.5 observa-se que ambas apresentam o mesmo comportamento do caso anterior (figura 4.1.3), isto é, o aumento da concentração de decapante conduz ao aumento da perda de massa das placas de alumínio. Relativamente ao impacto causado pelo aumento da concentração de desengordurante, verifica-se que este é muito pouco significativo. No que diz respeito ao ensaio realizado quando a concentração de desengordurante era máxima (37,6mL/L) e ambas as concentrações de decapante mínimas (2,5%), verifica-se que a perda de massa das placas é inferior relativamente a outros ensaios. Por estas razões, será importante observar o(s) efeito(s) que estas condições de tratamento podem ter sobre as placas, nomeadamente, no ângulo de contacto, espessura do revestimento e no teste da quadrícula. Da análise das duas figuras pode-se ainda verificar que o facto da concentração de decapante no primeiro tanque ser superior à do segundo, ou vice-versa, não influencia praticamente a variação da perda de massa. De facto, tal como se pode observar na figura 4.1.4 a), quando a concentração do segundo tanque de decapagem foi superior à do primeiro (verde e vermelho), a perda de massa desses ensaios foi praticamente igual ao caso em que a concentração de decapante no primeiro tanque foi superior à do segundo (figura 4.1.5 a) – a verde e a vermelho).

De seguida, voltou-se a realizar o mesmo estudo para a perda de massa das placas, mas fixando-se uma das concentrações no seu valor intermédio (3,5% V/V). Numa primeira etapa começou-se por fixar a concentração do primeiro banho de decapagem, variando a concentração de decapante no segundo tanque (figura 4.1.6). De forma similar, avaliou-se a influência da concentração do primeiro banho de decapagem no grau de lavagem, fixando-se desta vez a concentração de decapante no segundo tanque, como mostra a figura 4.1.7.

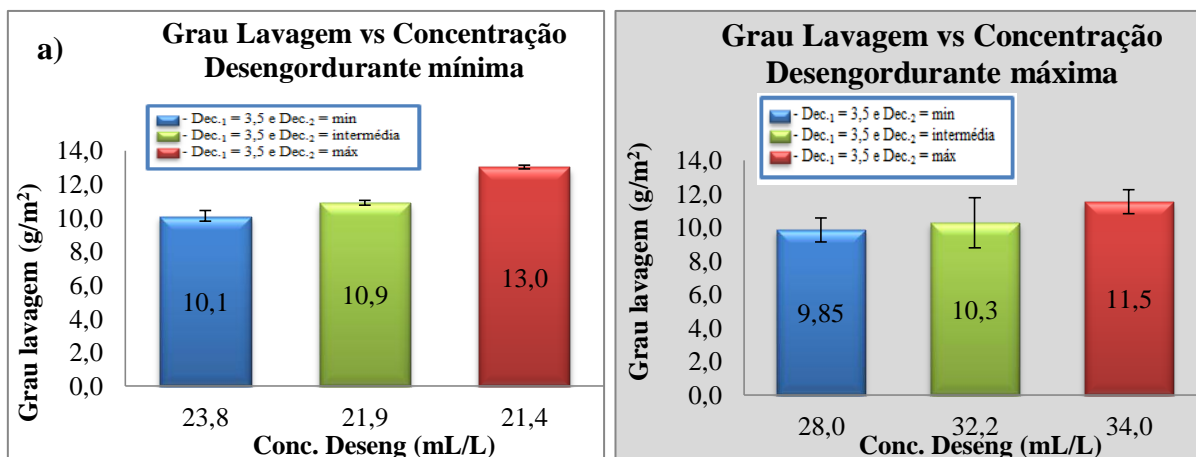


Fig. 4.1.6 – Evolução do grau de lavagem em função da concentração de desengordurante: a) mínima e b) máxima, para os casos em que se fixou a concentração do primeiro tanque de decapagem no valor intermédio (3,5%), variando a concentração do segundo tanque de decapagem. As barras de erro apresentadas correspondem aos desvios padrão obtidos no cálculo do grau de lavagem, em cada ensaio.

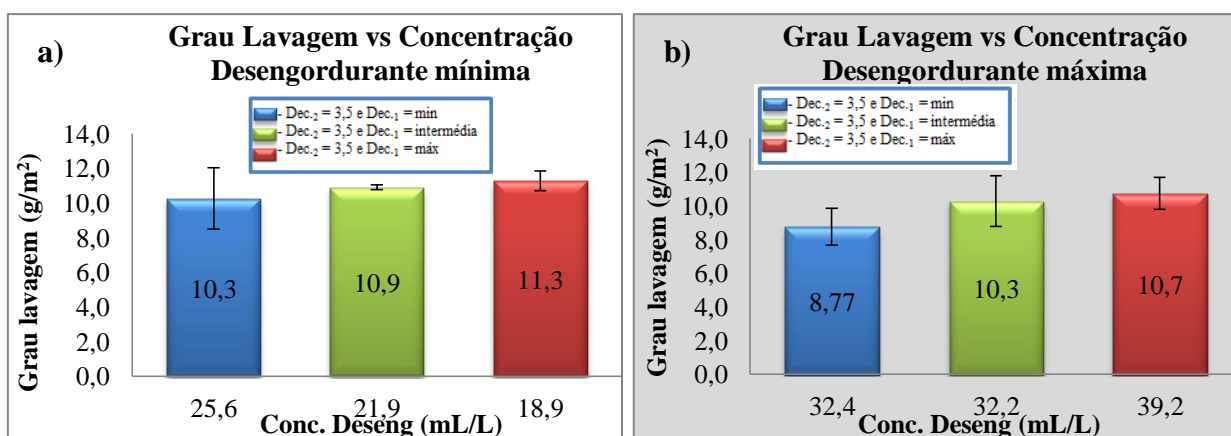


Fig. 4.1.7 – Evolução do grau de lavagem em função da concentração de desengordurante: a) mínima e b) máxima, para os casos em que se fixou a concentração do segundo tanque de decapagem no valor intermédio (3,5%), variando a concentração do primeiro tanque de decapagem. As barras de erro apresentadas correspondem aos desvios padrão obtidos no cálculo do grau de lavagem, em cada ensaio.

Relativamente às figuras 4.1.6 e 4.1.7, observa-se mais uma vez o aumento da perda de massa das placas de alumínio com o aumento da concentração de decapante, para ambos os casos (a branco e a cinzento). Além disso, também se comprova mais uma vez o que foi referido nos casos das figuras 4.1.4 e 4.1.5, isto é, quer a variação da concentração de desengordurante, quer o facto de se ter a concentração de decapante no primeiro tanque superior à do segundo, ou vice-versa, não influenciam praticamente em nada a perda de massa das placas.

Por fim, avaliou-se novamente o efeito da concentração de desengordurante e decapante sobre a perda de massa das placas, mas fixando uma das concentrações no seu valor máximo (5,0% V/V). Na figura 4.1.8 fixou-se a concentração de decapante no primeiro tanque no seu valor máximo, variando a concentração do segundo tanque de decapagem, de forma similar às anteriores. A figura a) diz respeito a essa evolução na gama de concentrações de

desengordurante mínimo, enquanto a b) corresponde à gama máxima. Por sua vez, na figura 4.1.9 apresenta-se a mesma sequência, mas desta vez variando a concentração do primeiro banho de decapagem.

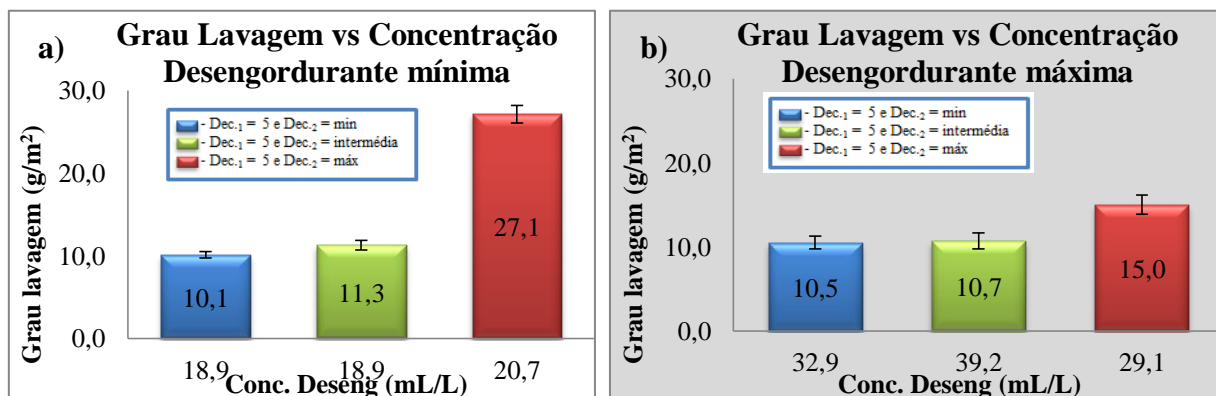


Fig. 4.1.8 – Evolução do grau de lavagem em função da concentração de desengordurante: a) mínima e b) máxima, para os casos em que se fixou a concentração do primeiro tanque de decapagem no valor máximo (5,0%), variando a concentração do segundo tanque de decapagem. As barras de erro apresentadas correspondem aos desvios padrão obtidos no cálculo do grau de lavagem, em cada ensaio.

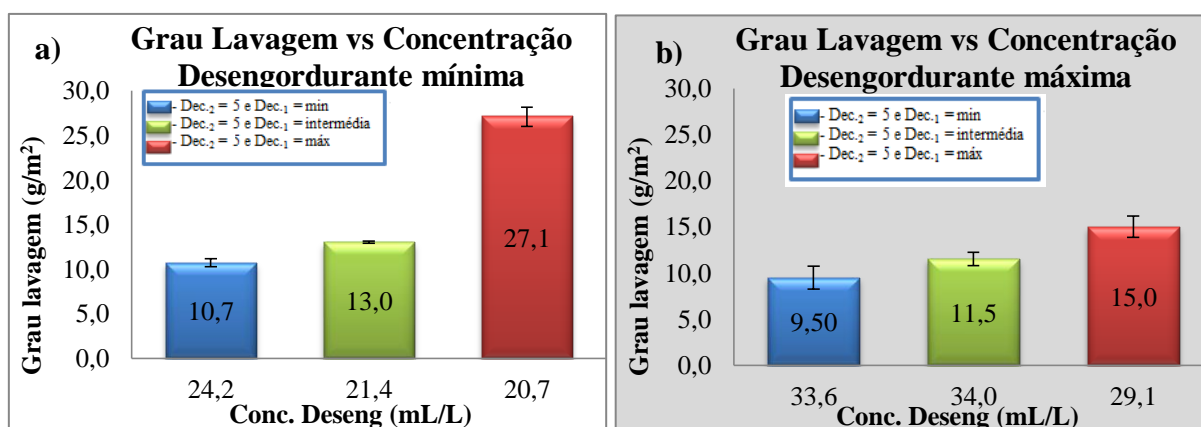


Fig. 4.1.9 – Evolução do grau de lavagem em função da concentração de desengordurante: a) mínima e b) máxima, para os casos em que se fixou a concentração do segundo tanque de decapagem no valor máximo (5,0%), variando a concentração do primeiro tanque de decapagem. As barras de erro apresentadas correspondem aos desvios padrão obtidos no cálculo do grau de lavagem, em cada ensaio.

Através da análise das figuras 4.1.8 e 4.1.9 constata-se mais uma vez o que foi discutido para os casos anteriores, ou seja, que é praticamente indiferente se a concentração do primeiro tanque de decapagem é superior à do segundo banho, ou vice-versa.

Desta forma, pode-se afirmar que a perda de massa das placas de alumínio depende diretamente da concentração de decapante, uma vez que quando maior é a concentração do banho maior é a perda de massa do substrato. Como foi apresentado no capítulo 2 desta dissertação, a decapagem é responsável pela remoção dos óxidos, entre outros contaminantes, da superfície do substrato. Contudo, é fundamental que, após a remoção de todos estes contaminantes, o ataque ácido não progrida, o que pode estar a acontecer quando se aumenta

muito a concentração de decapante, uma vez que a perda de massa é significativa nestes casos. Como foi referido, este facto é totalmente indesejável não só no que toca à durabilidade e resistência do metal, mas também porque diminui o tempo de vida útil dos equipamentos utilizados no processo (corrosão), e provoca danos ambientais. Desta forma, considera-se mais vantajoso trabalhar a concentrações mais reduzidas de decapante, não só pelos fatores apresentados, mas também por se conseguir uma poupança de produto e aumento do tempo de vida útil das águas de lavagem posteriores aos tanques de decapagem.

Uma vez que a variação da perda de massa das placas não é muito significativa, ainda que diminua substancialmente quando se aumenta a concentração de desengordurante, não se pode definir um valor ótimo para a concentração de desengorduramento. Tendo em conta o fator económico, o ideal seria trabalhar a concentrações de desengordurante mínimas (nunca inferiores a 18,3mL/L), porém nos ensaios realizados sob estas condições verificou-se que uma grande quantidade de resíduos era arrastada para os banhos posteriores, diminuindo o seu tempo de vida útil.

4.2. EVOLUÇÃO DO pH DAS ÁGUAS DE LAVAGEM

Como foi apresentado na revisão bibliográfica desta dissertação, as águas de lavagem assumem um papel fundamental no processo de tratamento da superfície do alumínio, uma vez que são responsáveis por remover os resíduos provenientes do desengorduramento e da decapagem. Além disso, é muito importante que estas águas se apresentem o mais livre de contaminantes possível para que ocorra um perfeito enxaguamento do alumínio, deixando-o livre de quaisquer contaminantes.

Nesta secção avaliou-se a evolução do pH das águas de lavagem ao longo de aproximadamente dois meses. Na figura 4.2.1 apresentam-se as leituras obtidas para o pH das águas dos tanques posteriores ao desengorduramento (\blacklozenge e \blacksquare), e à decapagem (\blacktriangle e \times).

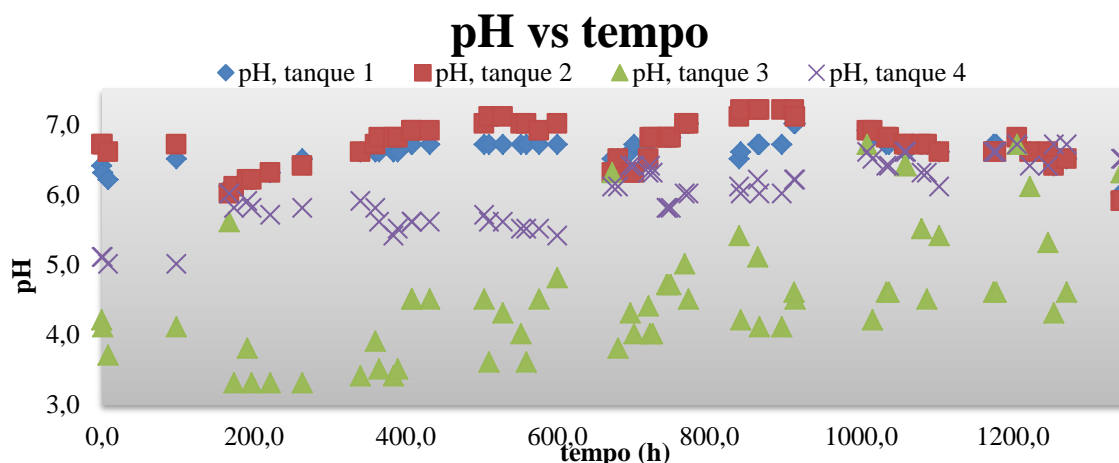


Fig. 4.2.1 – Evolução do pH ao longo do tempo, nos quatro tanques do processo de tratamento das placas de alumínio da empresa.



Através da análise da figura 4.2.1, observa-se que o pH das águas de lavagem dos tanques posteriores ao desengorduramento (tanques 1 e 2) permanece praticamente constante ao longo do tempo. Esta situação ocorre uma vez que o operador remove diariamente os resíduos superficiais do banho, acrescentando, posteriormente, água corrente até ser atingido o nível do tanque.

Relativamente ao pH da água dos tanques 3 e 4, observa-se que este é relativamente inferior ao dos tanques 1 e 2, nomeadamente o do banho 3. Esta situação pode ser explicada pelo facto dos tanques de lavagem com água estarem imediatamente a seguir aos de decapagem que, por sua vez são constituídos por ácidos fortes. Os resíduos ácidos da decapagem fixam-se na superfície da placa, sendo posteriormente arrastados para os banhos de lavagem, contribuindo desta forma para a diminuição significativa do pH ao longo do dia e do tempo de vida útil destes banhos. Com o principal objetivo de se diminuir o arrastamento dos resíduos para os tanques de lavagem, seria importante aumentar o tempo de escoamento da decapagem para o primeiro tanque de lavagem com água. Além disso, tendo em conta que o pH da água diminui consideravelmente ao longo de um dia de trabalho, seria também importante que a remoção dos contaminantes da superfície do banho comesçasse a ser realizada três vezes ao dia, em vez da habitual remoção no início de cada dia de trabalho, para que não haja um consumo excessivo de água.

4.3. EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE DESENGORDURANTE E DECAPANTE NA ESPESSURA DO REVESTIMENTO

Nesta secção avaliou-se o impacto causado pela variação da concentração de desengordurante e decapante na espessura seca do revestimento. Numa primeira fase mediu-se a espessura da película de Greblon para os ensaios realizados em condições de grande instabilidade. Como foi referido no subcapítulo anterior, a grande maioria das placas de alumínio que foram tratadas sob estas condições, após terem sido revestidas, apresentaram sinais de descascamento (não-homogeneidade). Por estas razões, as placas eram novamente inseridas na linha de pintura, passando novamente por todo o processo de aplicação e processamento do revestimento antiaderente. Posto isto, além de se ter avaliado a espessura da película depositada sob estas placas, avaliou-se ainda o impacto provocado pela “repintura” destas placas, como demonstra a figura 4.3.1.

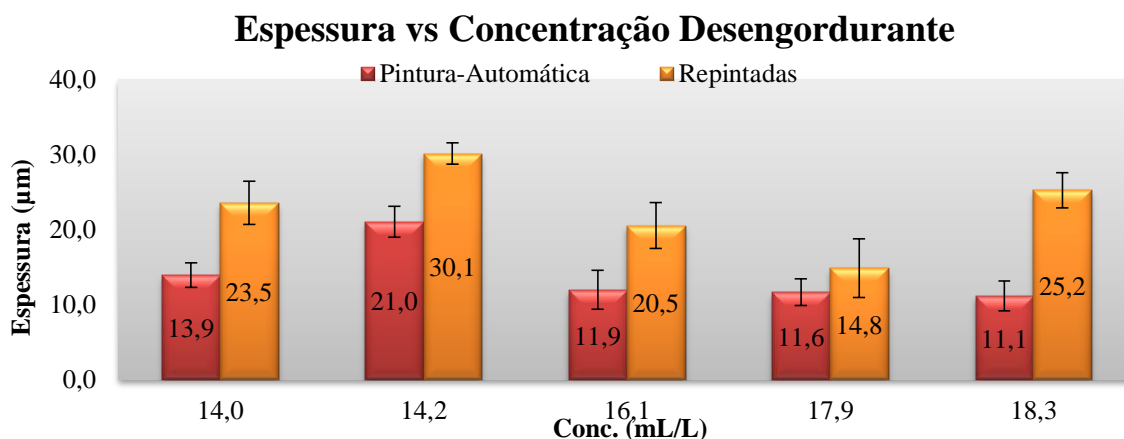


Fig. 4.3.1 – Variação da espessura para os ensaios realizados sob as condições referidas na secção anterior deste capítulo, isto é, quando o sistema apresentava grande instabilidade. As barras de erro apresentadas correspondem aos desvios padrão obtidos na medição das espessuras, obtidas pelo Elcometer.

Tendo em conta a heterogeneidade dos revestimentos resultantes do método de pintura, a medição da espessura de um revestimento deve ser realizada em zonas distintas, tal como é explicado na metodologia (cap.3) e ilustrado na figura 3.7.1. Os valores de espessura apresentados na figura 4.3.1 correspondem às medições efetuadas na zona identificada com o número 3 (figura 3.7.1), para o caso em que só se utilizou a pintura automática (vermelho), e quando as placas revestidas voltaram a ser inseridas na linha de pintura de antiaderentes (a laranja).

Relativamente aos resultados obtidos para as placas sujeitas a estas condições de tratamento, além de não se conseguir ter uma perceção da influência da concentração de desengordurante na espessura do revestimento, constata-se que na maioria dos casos a espessura (a vermelho) está fora da gama estabelecida pela ficha técnica do produto (14,0 e 20,0μm). Estes resultados comprovam o que foi discutido na secção anterior deste capítulo, ou seja, para valores de concentração de desengordurante inferiores a 18,3mL/L o processo de tratamento das placas apresenta grande instabilidade, não removendo adequadamente os contaminantes da superfície do alumínio, os quais que influenciam negativamente o contacto entre o revestimento e o substrato. Por estas razões, é necessário que a grande maioria das placas volte a passar por todo o processo de aplicação do antiaderente, o que leva a que a espessura do revestimento ultrapasse significativamente a gama indicada pelo fornecedor.

De seguida, avaliou-se a influência da concentração dos banhos de desengorduramento e decapagem na espessura do revestimento, de forma similar à análise da figura 4.1.3. A figura 4.3.2 (a branco) mostra o impacto causado na espessura do revestimento na zona 3 da placa pela variação da concentração de decapante, a concentrações mínimas de desengordurante. Por sua vez, na figura b) (a cinzento) representa-se essa mesma sequência, desta vez no caso em que a concentração de desengordurante foi máxima.

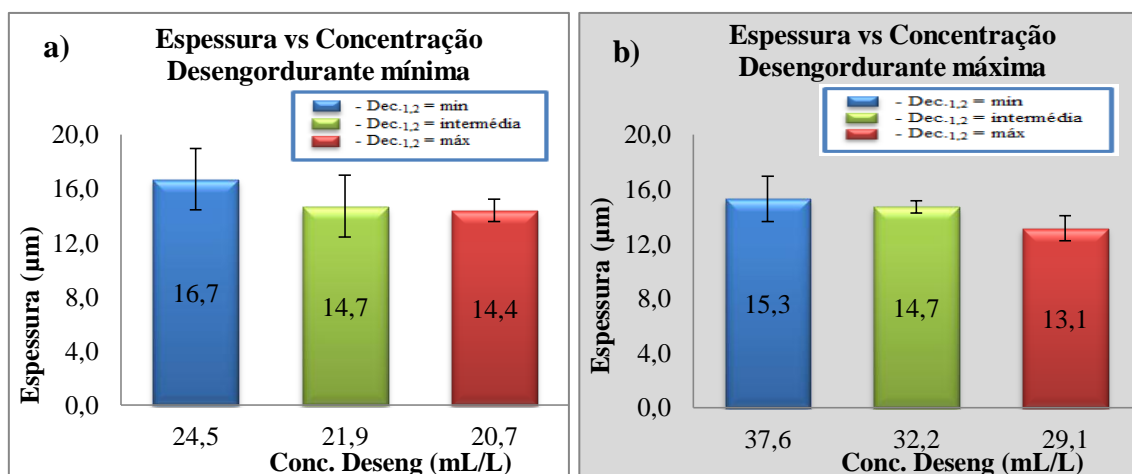


Fig. 4.3.2 – Evolução da espessura do revestimento em função da concentração de desengordurante: a) mínima e b) máxima, para os casos em que se alterou as duas decapagens simultaneamente. As barras de erro apresentadas correspondem aos desvios padrão obtidos na medição das espessuras, obtidas pelo Elcometer.

Através da análise da figura 4.3.2. pode-se verificar que a variação da espessura do revestimento com a concentração dos banhos é praticamente insignificante. Na figura a) (a branco) e na figura b) observa-se um ligeiro decréscimo da espessura com o aumento da concentração de decapante, mas se tivermos em conta os desvios padrão obtidos para cada ensaio, visualizamos que esse efeito é praticamente anulado. O mesmo se aplica para o caso em que a concentração de desengordurante foi máxima (figura a cinzento), observando-se, contudo, que quando a concentração dos banhos de decapante é a máxima permitida (5,0%), a espessura do revestimento encontra-se fora da gama permitida pela ficha técnica do produto. Quando se comparam as duas figuras (a e b), verifica-se mais uma vez que o efeito da concentração, neste caso de desengordurante, praticamente não afeta a espessura do revestimento de Greblon.

Na secção anterior deste capítulo, fez-se referência a dois casos particulares que se deveria ter em conta ao longo da discussão, isto é, (i) quando a concentração de desengordurante foi de 37,6 mL/L e as de decapante 2,5 % (V/V), e (ii) quando a concentração de desengordurante foi de 20,7 mL/L e as de decapante 5,0 % (V/V). Nestes ensaios, verificou-se que a perda de massa das placas de alumínio foi consideravelmente diferente dos restantes ensaios, 5,78 e 27,1g/m², respetivamente. No que toca à espessura do revestimento de Greblon para estes casos, como se pode visualizar pela figura 4.3.2, a diferença entre os seus valores é praticamente insignificante (15,3 ± 1,7 e 14,4 ± 0,8 μm, respetivamente). Desta forma, comprova-se mais uma vez que a concentração dos banhos não influencia praticamente a espessura da película formada sobre superfície do alumínio.

Por todas estas razões, remeteu-se para anexo os restantes gráficos que avaliavam o efeito da espessura da película em função da concentração dos tanques de desengorduramento e de decapagem. Na grande maioria dos casos, verificou-se que tanto a concentração de decapante, como a de desengordurante não influenciavam significativamente a espessura do



revestimento nesta zona da placa. Da análise destes gráficos, verificaram-se apenas três situações em que a espessura do revestimento se encontrava fora da gama estabelecida pelo fornecedor, apresentando um valor substancialmente diferente dos restantes ensaios.

O primeiro dos casos já foi identificado na análise à figura 4.3.2., ou seja, quando a concentração de desengordurante e de decapante foram máximas ($13,1 \pm 0,9\mu\text{m}$). O segundo (figura D1), diz respeito ao ensaio em que a concentração de desengordurante era mínima ($24,2\text{mL/L}$) e, a do primeiro e segundo tanque de decapagem era 2,5 e 5,0%, respetivamente. Neste caso, a espessura do revestimento obtida para a zona 3 da placa, ultrapassou a gama estabelecida ($21,3 \pm 3,8\mu\text{m}$). Finalmente, identificou-se outro caso em que a espessura apresentada excedia a gama definida ($21,5 \pm 2,4\mu\text{m}$), como mostra a figura D2. Este ensaio foi realizado utilizando a concentração de desengordurante máxima ($28,0\text{mL/L}$) e, a de decapante, no primeiro e segundo tanque era 3,5 e 2,5%, respetivamente. Estes gráficos podem ser visualizados no anexo D desta tese.

Tendo em conta os resultados obtidos, pode-se afirmar que o efeito da concentração dos banhos na espessura do revestimento de Greblon é praticamente insignificante. Mais uma vez é muito difícil definir as condições ótimas de trabalho, não só pelos resultados que foram obtidos, mas por existirem mais fatores que influenciam a espessura do revestimento, nomeadamente a viscosidade da tinta, a pressão da pistola de pulverização, o tempo de pintura ou ainda a diferença de potencial utilizado. É importante ainda salientar que não nos limitámos a analisar a zona 3 da placa, ou seja, o local onde praticamente não ocorre variação da espessura após aplicação manual da tinta. Existiram ainda muitas situações em que a película formada na superfície do alumínio não era perfeitamente homogénea, razão pela qual se estudou a distribuição da espessura ao longo de toda a placa, como se apresenta na secção seguinte.

4.4. DISTRIBUIÇÃO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO NAS PLACAS DE ALUMÍNIO

Neste subcapítulo pretendeu-se avaliar a distribuição da espessura do revestimento ao longo da placa de alumínio. Como se mostra na figura 3.7.1 da metodologia, começou-se por identificar quatro diferentes zonas na placa, onde era perfeitamente visível que a aplicação da tinta era realizada de forma diferente. Na zona identificada com o número 1 verificava-se que a amplitude do robot de pintura era insuficiente para atingir este local. Após o processamento do revestimento, distinguia-se perfeitamente esta zona da placa das restantes, uma vez que praticamente não estava pintada. No local identificado com o número 2 observou-se uma acumulação de tinta naquela zona, tendo-se formado uma camada espessa de revestimento após cozimento da resina. Relativamente à zona 3, como já foi referido na secção anterior deste capítulo, corresponde ao local onde o revestimento era perfeitamente homogéneo e onde não

havia praticamente nenhuma aplicação da tinta por ação manual. Finalmente, considerou-se ainda uma zona 4, que correspondia ao local onde se observava que havia uma grande pulverização da tinta pelo operário.

Na figura 4.4.1 apresentam-se a média das espessuras obtidas nos diferentes ensaios realizados, para os vários locais assinalados da placa. As barras a azul dizem respeito à espessura média dos revestimentos obtidos apenas por pulverização automática (robot), sendo que a sigla “T” corresponde às placas de alumínio que foram pré-tratadas, e a sigla “ST” às que não sofreram qualquer tipo de tratamento prévio. De forma similar ao caso anterior, a verde apresenta-se a espessura média dos revestimentos obtidos, desta vez por via automática e manual. Finalmente, a vermelho mostra-se o efeito da “repintura” na espessura média do revestimento de Greblon.

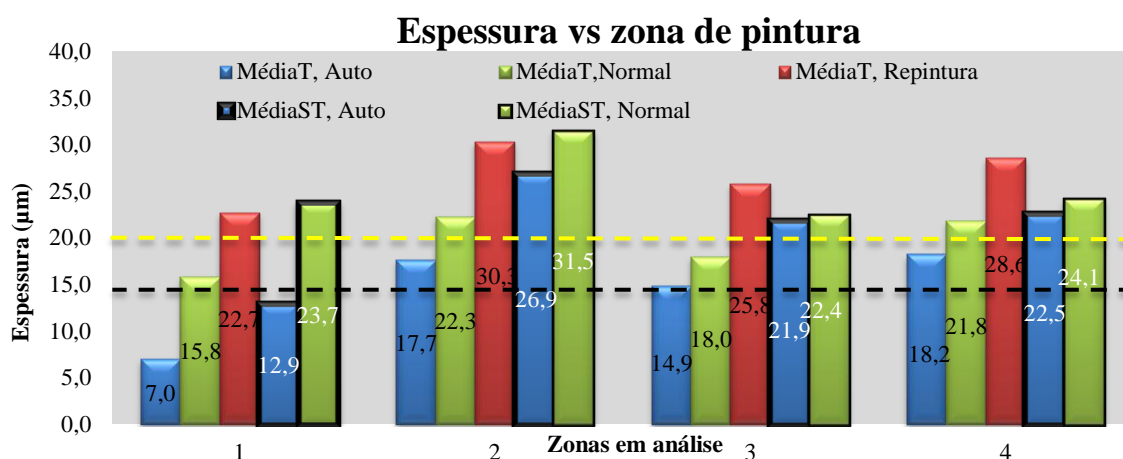


Fig. 4.4.1 – Variação da espessura do revestimento para as diferentes zonas da placa, obtido por diferentes formas de pintura e, conseqüente comparação com a espessura de um revestimento em que o substrato não sofreu qualquer tipo de tratamento prévio.

Através da análise da figura 4.4.1 constata-se que a distribuição da espessura média do revestimento de Greblon ao longo da placa é bastante heterogénea. Como era expectável, a zona identificada com o número 1 é o local da placa onde a espessura do revestimento é menor para praticamente todos os casos. Quando se observa o resultado obtido para a pintura automática (a azul), verifica-se que a espessura é significativamente inferior a todos os outros valores. Este facto mostra que é essencial aumentar a amplitude do robot de pulverização, de forma a que a tinta possa chegar perfeitamente a todas as zonas da placa, evitando-se assim a aplicação posterior de tinta por ação manual. Tanto para este caso, como para o da zona 3, a aplicação da tinta por pulverização manual após o processo automático de pintura (a verde), conduz a revestimentos com espessura dentro da gama estabelecida pelo fornecedor. Contudo, quando se observam os casos das zonas 2 e 4, verifica-se que esta aplicação é completamente desnecessária, levando a que a espessura do revestimento ultrapasse o máximo permitido pelo fornecedor. Em muitos casos, como será demonstrado em 4.5 deste capítulo, o facto de a

espessura ser muito elevada, minimiza as forças de adesão do revestimento, conduzindo a resultados negativos no teste da quadrícula.

Relativamente aos casos em que é necessário voltar a inserir as placas na linha de pintura (a vermelho), nomeadamente quando a película formada sob a superfície do alumínio não é perfeitamente homogénea, ou apresenta outros tipos de defeitos, por exemplo, o facto do revestimento ser facilmente desfeito, existe um aumento drástico da espessura da película em praticamente todas as zonas. Para minimizar esta situação, o ideal seria que antes de se inserir novamente as placas no processo de pintura, se polissem as zonas defeituosas com o auxílio de uma lixa (tendo em atenção os resíduos provocados por esta ação) e, posteriormente, se pulverizasse apenas a zona recuperada.

Finalmente avaliou-se a distribuição da espessura do revestimento ao longo de placas que não foram sujeitas a qualquer tipo de tratamento (“ST”). Da análise da figura 4.4.1. verifica-se que a espessura média dos revestimentos obtida quer por pintura automática (azul), quer por automática+manual (verde), é sempre superior à obtida para as placas tratadas (“T”). Uma análise menos cuidada dos resultados obtidos para as placas sem qualquer tipo de tratamento (“ST”) poderia sugerir que o ideal seria revestir as placas sem qualquer tipo de tratamento prévio, uma vez que não existe nenhuma situação que aponte no sentido contrário, sendo comprovado inclusive pelo teste da quadrícula (secção 5 deste capítulo). No entanto, como foi referido no capítulo 2 desta dissertação, embora a adesão do revestimento não seja praticamente afetada pela falta do tratamento prévio da superfície, a durabilidade da interação substrato-revestimento pode ficar seriamente comprometida. Como sugestão, para avaliar esta situação poderia realizar-se o teste de esfrega húmido.

De seguida avaliou-se um caso específico da empresa, em que a pintura é aplicada nas duas faces da placa de alumínio. Geralmente, nestas situações aumenta-se a diferença de potencial de $10 \pm 5\text{kV}$ para $50 \pm 5\text{kV}$. Posto isto, pretendeu-se avaliar o impacto causado na espessura média do revestimento pelo aumento de potencial, como mostra a figura 4.4.2.

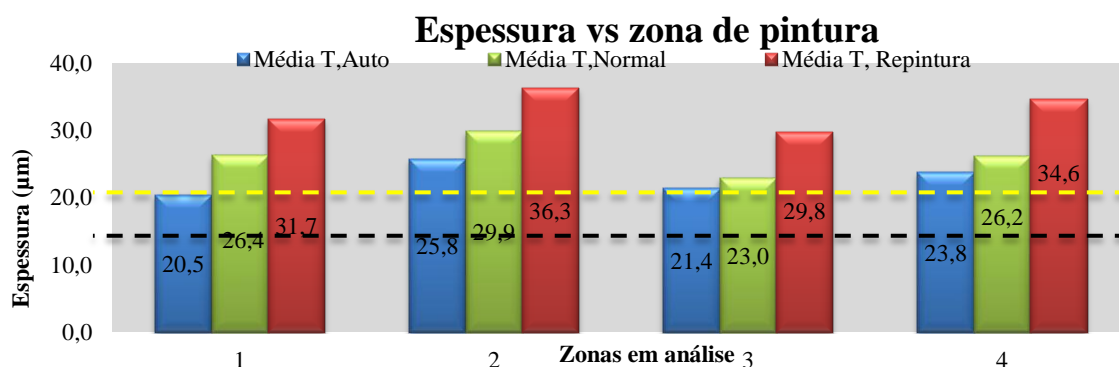


Fig. 4.4.2 – Variação da espessura do revestimento para as diferentes zonas da placa, obtido por diferentes formas de pintura e, em função do aumento da diferença de potencial.

Ao comparar-se a figura 4.4.2 com a 4.4.1, observa-se que existe um aumento drástico da espessura média do revestimento de Greblon, levando a que todos os valores se encontrem fora da gama estabelecida pelo fornecedor. Como referido anteriormente, é fundamental que as forças de coesão do revestimento sejam suficientemente fortes para garantir que este não se desfaça com relativa facilidade. Porém, o aumento da espessura para valores consideravelmente superiores ao máximo permitido pode colocar em causa esta situação, tal como se comprovará pelo resultado do teste da quadrícula para os revestimentos obtidos nestas condições. Neste caso específico de revestimento nas duas faces da placa, seria importante redefinir as condições utilizadas no processo de pintura, para que a resistência, durabilidade e adesão do revestimento não seja posta em causa.

4.5. TESTES DA QUADRÍCULA

Nesta secção procedeu-se à avaliação do grau de adesão do revestimento ao substrato, isto é, à maior ou menor facilidade com que se consegue separar a película de Greblon do alumínio. Para isso, recorreu-se ao teste da quadrícula para se poder quantificar este ensaio. Na figura 4.5.1 apresentam-se os resultados para o caso em que o sistema apresentava grande instabilidade, isto é, relativos aos ensaios realizados com concentrações de desengordurante inferiores a 18,3mL/L. A azul representam-se os testes realizados quando a aplicação da tinta foi apenas por ação automática, antes e após se ter mergulhado as quadrículas em água desmineralizada em ebulição, e , respetivamente. A verde mostram-se os resultados obtidos quando a pulverização da tinta no substrato foi realizada de forma automática e com ação por parte do operador (e). Finalmente, a vermelho apresentam-se os casos em que as placas já revestidas eram novamente inseridas no processo de pintura (e).

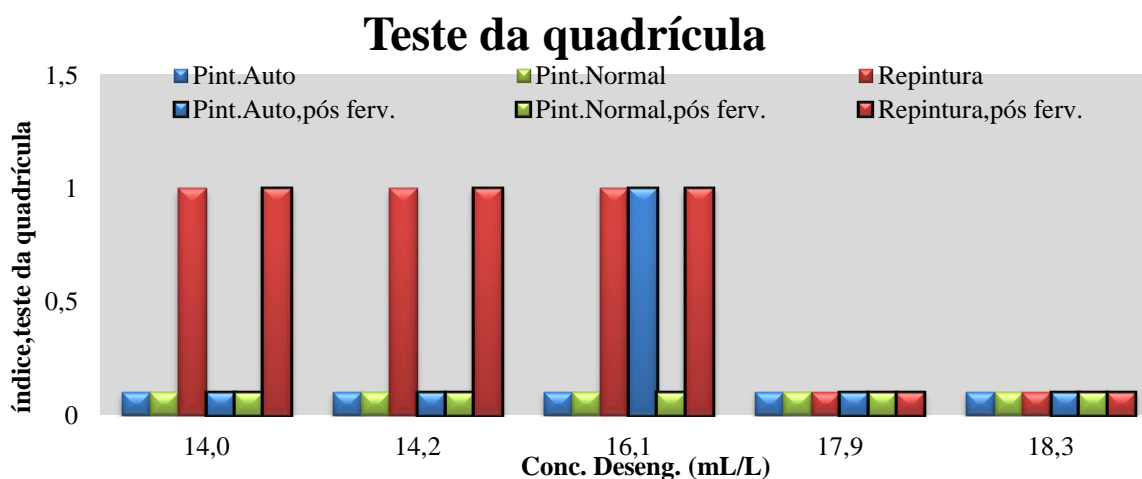


Fig. 4.5.1 – Representação gráfica dos resultados obtidos pelo teste da quadrícula para os ensaios realizados sob condições de instabilidade, ou seja, a concentrações de desengordurante inferiores a 18,29mL/L.

Embora estes ensaios tenham sido realizados em condições adversas, da análise da figura 4.5.1 podemos concluir que esse facto não se fez praticamente sentir no teste da quadrícula, uma vez que grande parte destes tiveram como resultado o índice “0” (tabela 3.9.1 – secção 3). Esta situação já era expectável, pois como se estudou e verificou ao longo desta dissertação, o impacto causado na adesão do revestimento pela concentração dos banhos é praticamente insignificante. Por sua vez, no que toca à durabilidade da interação substrato-revestimento pensa-se que as concentrações quer de decapante, quer de desengordurante influenciam consideravelmente esta característica. Mais uma vez deixa-se como sugestão a inclusão dos testes de esfrega húmido de forma a avaliar este parâmetro.

Relativamente aos resultados obtidos, como era de esperar, quando se voltavam a submeter as placas revestidas ao processo de pintura, a grande maioria teve classificação negativa. Esta situação, como ficou demonstrado ao longo desta tese, pode ser explicada pelo facto das forças entre revestimento e o metal não serem suficientemente fortes (devido à espessura excessiva de revestimento nestes casos), o que leva à remoção da camada de antiaderente com relativa facilidade.

No que toca ao facto de se sujeitar as placas após o ensaio da quadrícula a condições extremas, isto é, mergulhá-las em água quente e, após 15 minutos, passá-las por água fria, quando se voltou a realizar o teste da quadrícula verificou-se que em alguns casos o grau de adesão diminuiu. Este facto leva a que se conclua que um tratamento deficiente das placas conduz à diminuição da sua resistência.

Como já foi estudado no capítulo 2 desta discussão, a principal consequência de um mau tratamento da superfície do alumínio consiste na diminuição da durabilidade do sistema revestimento-substrato, afetando muito pouco a adesão da película ao metal. Este facto foi comprovado pela realização dos testes da quadrícula em placas que foram revestidas sem qualquer tratamento prévio. Neste caso, o resultado em todas elas foi nulo (“0”), subscrevendo a teoria apresentada, como pode ser observado na tabela E1 do anexo E. Por esta razão, a grande maioria dos ensaios realizados apresentou uma relativa dificuldade à separação da película do metal, ou seja, apresentaram um índice de grau de adesão “0” (positivo). Assim, optou-se apenas por representar os ensaios em que este índice não foi nulo, ou seja, sistemas em que se separa a película de revestimento com alguma facilidade do alumínio, como mostra a figura 4.5.2. Na tabela E2 do anexo E, podem ser consultadas as condições em que cada ensaio foi realizado.

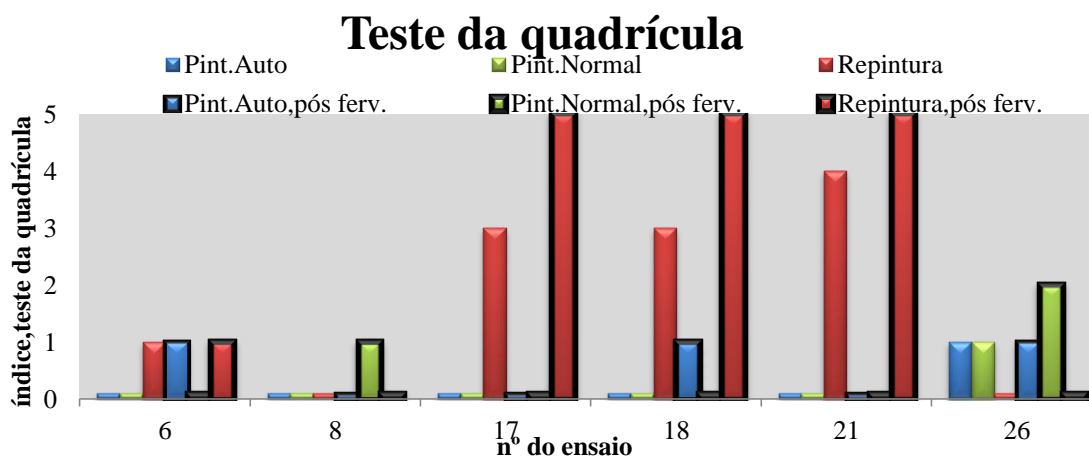


Fig. 4.5.2 - Resultados do teste da quadrícula para os ensaios em que se obteve um índice de grau de adesão diferente de zero, representado para as diferentes formas de aplicação da tinta.

Através da análise da figura 4.5.2 podemos verificar que os ensaios 8, 17 e 18 apresentaram um resultado negativo para o teste da quadrícula. Estes foram identificados em 4.1 desta discussão (figura 4.1.2. a azul) como aqueles que dizem respeito ao tratamento obtido quando se pretendia que a concentração dos banhos de decapagem atingisse determinado valor, mas por diversas razões, essas condições nunca foram conseguidas. Desta forma, excluíram-se estes ensaios da discussão uma vez que não se tinha completamente a certeza das condições de tratamento a que estas placas foram sujeitas.

O ensaio número 6 foi apresentado na discussão do efeito da concentração na espessura do revestimento (Concentração de desengordurante = 28,0mL/L – figura D2 do anexo D). Neste, verificou-se que a espessura apresentada era consideravelmente superior à dos restantes ensaios. O facto de ter apresentado um resultado negativo para o teste da quadrícula, comprova o que foi referido relativamente às forças de coesão e adesão do revestimento, ou seja, que as forças entre as partículas do revestimento, e entre o revestimento e o substrato são menores quanto maior for a sua espessura.

Relativamente ao ensaio número 26, como se pode verificar na tabela E2 do anexo E, as placas foram sujeitas a concentrações mínimas de desengordurante (18,9mL/L), máximas no primeiro tanque de decapagem e mínimas no segundo. Tendo em conta os resultados obtidos pelo teste da quadrícula, verifica-se que nestas condições o contacto revestimento-substrato não é o ideal. Por sua vez, conclui-se que quando trabalhamos com uma concentração de desengordurante tão baixa temos de aumentar uma das decapagens, para que nenhuma falha ocorra no sistema, como pode ser verificado pelo ensaio 25, onde a concentração de desengordurante era exatamente a mesma do ensaio 26, mas por sua vez, a concentração de decapante no segundo tanque era superior. Porém, como já foi demonstrado, o facto de se trabalhar com concentrações muito reduzidas de desengordurante, leva à diminuição do tempo de vida útil dos banhos posteriores.

No que diz respeito ao ensaio número 21, tanto para o estudo da perda de massa das placas tratadas nestas condições, como para o da espessura do revestimento, não se verificou qualquer adversidade. Por esta razão, a única hipótese possível para o resultado negativo do teste da quadrícula consiste no facto de se aplicar uma quantidade de tinta excessiva quando estas placas revestidas são novamente submetidas ao processo de pintura. Contudo, considerou-se este ensaio na determinação dos ângulos de contacto (secção 6 deste capítulo), com o principal objetivo de avaliar o efeito do tratamento nestas placas.

Assim, mais uma vez ficou comprovado que quando as placas não são eficientemente tratadas, a resistência apresentada diminui significativamente, como mostram os resultados obtidos quando se submeteu as placas a condições extrema (figura 4.5.2).

▪ Testes da quadrícula com mais diferença de potencial

Na figura 4.5.3 apresentam-se os resultados do teste da quadrícula, obtidos para o estudo complementar das placas revestidas nas duas faces, utilizando uma diferença de potencial superior. Os ensaios apresentados foram realizados nas condições do número correspondente, que podem ser consultadas na tabela E2 do anexo E. Apresentam-se apenas os resultados em que se obtiveram índices de grau de adesão negativos, uma vez que nos ensaios 1, 2, 7, 8, 30 não se registou qualquer sinal de separação da película do metal.

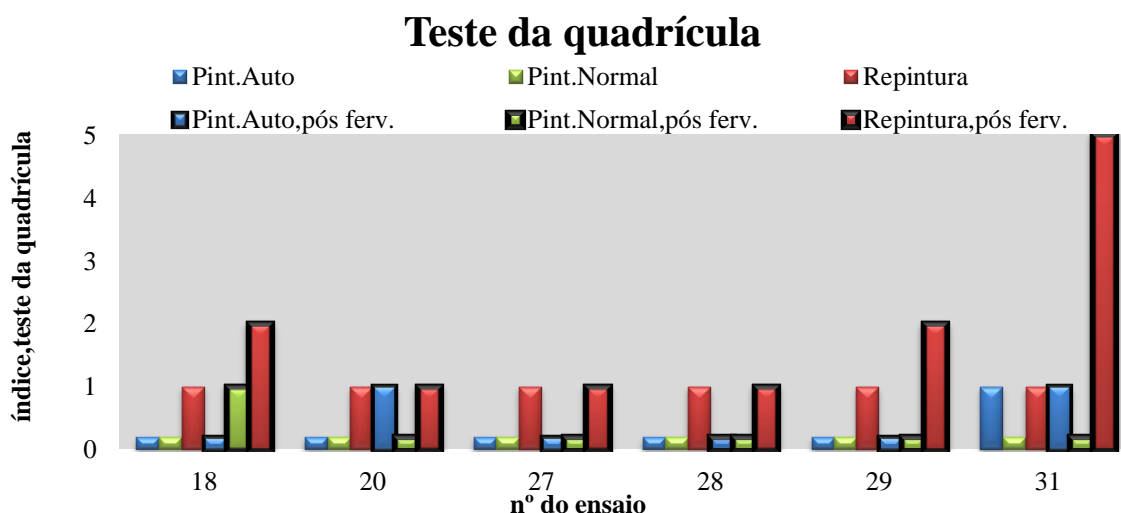


Fig. 4.5.3 - Resultados obtidos pelo teste da quadrícula, para os ensaios realizados utilizando uma diferença de potencial elevada.

Como se pode verificar pela análise da figura 4.5.3, a grande maioria dos ensaios realizados nestas condições de aplicação da tinta apresentou um resultado negativo neste teste. Por sua vez, quando estes revestimentos foram sujeitos a condições extremas (água quente e fria), praticamente todos os ensaios tiveram resultados negativos.

Por estas razões, conclui-se que é fundamental estudar o efeito dos parâmetros de pintura, nomeadamente a diferença de potencial, pressões de pulverização, tempo de pintura,

entre outros, para este caso específico. Nestas condições de pintura, é perfeitamente notório que a adesão do revestimento de Greblon fica seriamente comprometida, em resultado do decréscimo das forças de coesão entre as partículas da resina e da interação substrato-revestimento.

4.6. ÂNGULOS DE CONTACTO

Por fim, avaliou-se o ângulo de contacto formado entre a superfície do alumínio e a água, com o principal objetivo de quantificar as interações ao nível molecular entre líquidos e sólidos em contacto direto na interface por eles formada. Nesta fase, selecionou-se um conjunto de ensaios particularmente distintos, com o principal objetivo de comprovar algumas das conclusões tiradas ou, em alguns casos, obter uma melhor perceção de como determinadas condições de tratamento influenciaram a superfície do substrato.

Inicialmente, pretendeu-se determinar os ângulos de contacto para os casos em que o sistema apresentava grande instabilidade devido à concentração de desengordurante ser inferior a 18,3mL/L (azul), ou quando os resultados do teste da quadrícula foram particularmente insatisfatórios (vermelho), como mostra a figura 4.6.1.

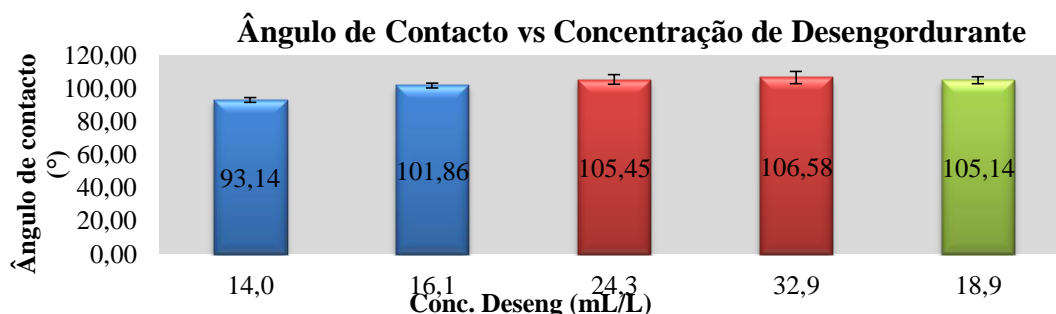


Fig. 4.6.1 - Evolução do ângulo de contacto formado entre a superfície de alumínio e a água, para os casos em que o sistema apresentava grande instabilidade (azul), ou quando o resultado dos testes da quadrícula foram negativos (vermelho).

Pela análise da figura 4.6.1, quando a concentração de desengordurante era inferior ao mínimo definido (paralelismo com a figura 4.1.2 da secção 1), sendo as decapagens também mínimas (a azul), verificou-se que a média dos ângulos de contacto formado entre o substrato e a água eram inferiores aos restantes casos. Este facto leva-nos a afirmar que uma superfície que não seja eficazmente desengordurada não apresenta uma superfície favorável ao contacto com o revestimento. Por sua vez, é difícil tirar alguma conclusão relativamente aos outros ensaios (a vermelho e a verde), uma vez que apresentam ângulos de contacto praticamente semelhantes.

De salientar que na secção anterior, ensaio nº 26 – tabela E2 do anexo E, fez-se referência ao ensaio realizado quando a concentração de desengordurante era 18,8mL/L (a verde), uma vez que se obteve para este caso um resultado negativo no teste da quadrícula. Porém, pela análise da média dos ângulos de contacto formados entre a sua superfície e água,

pode-se afirmar que, aparentemente, nestas condições não existe qualquer indício que mostre que não existe uma boa interação entre a sua superfície e o revestimento, tendo em conta que o valor obtido para o ângulo de contacto neste caso é semelhante aos dos outros ensaios.

Numa segunda fase, avaliou-se a relação entre a perda de massa das placas de alumínio e o ângulo de contacto entre a sua superfície e uma gota de água. Na figura 4.6.2, a azul apresenta-se a média dos ângulos de contacto obtidos para o ensaio em que as placas não sofreram qualquer tipo de tratamento prévio. Por sua vez, representam-se os dois casos em que se verificou uma diferença bastante significativa entre a sua perda de massa, que correspondem aos ensaios número 23 (a vermelho) e 1 (a verde).

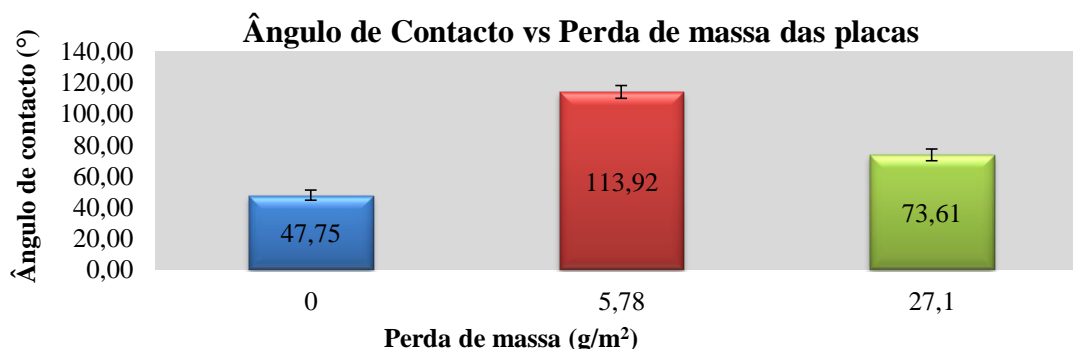


Fig. 4.6.2 – Evolução do ângulo de contacto formado entre as superfície de alumínio e a água, para os casos onde se observou uma diferença acentuada da perda de massa em relação aos restantes casos (vermelho e verde) e, quando a placa não foi sujeita a qualquer tipo de tratamento (azul).

Analisando a figura 4.6.2 observa-se que para o ensaio onde a perda de massa foi menor (Concentração de Desengordurante = 37,6mL/L), o ângulo de contacto foi o mais elevado de todos os ensaios realizados. Por sua vez, quando o metal perdeu uma grande quantidade de massa durante o tratamento da sua superfície, o ângulo de contacto formado com a água só foi superior ao do das placas que não sofreram qualquer tipo de tratamento. Por estas razões podemos afirmar que quando existe um ataque excessivo ao metal por ação do ácido, a superfície da placa apresenta-se pouco favorável à interação com o revestimento.

Ainda através da análise da figura 4.6.2 verifica-se que a concentração de desengordurante influencia significativamente o ângulo de contacto formado entre a superfície e a água, isto é, no caso em que a concentração de desengordurante utilizada foi máxima (a vermelho), o ângulo de contacto obtido foi máximo (113,92°) e, consequentemente, superior ao ensaio realizado quando a concentração era mínima (a verde). Porém é muito importante salientar que no caso a verde, a perda de massa pode causar rugosidade significativa, o que vai influenciar o ângulo de contacto, não se podendo estabelecer completamente uma relação entre ambos os casos.

Desta forma pode-se concluir que é fundamental que uma superfície seja previamente tratada antes da aplicação do revestimento, sendo igualmente importante que a concentração de



desengordurante nunca seja mínima, uma vez que os ensaios realizados nestas condições mostraram que existe um prejuízo das interações revestimento-substrato. Relativamente aos restantes ensaios observou-se que os ângulos de contacto obtidos eram praticamente iguais, não sendo possível uma avaliação completamente esclarecedora das interações moleculares nestes casos. Como sugestão, poder-se-ia calcular a energia livre de superfície e o trabalho de adesão utilizando pelo menos dois outros líquidos para além da água, de modo a obter uma melhor caracterização da molhabilidade. Além disso, dever-se-ia fazer um estudo detalhado sobre o efeito das condições utilizadas nos diversos tratamentos sobre a rugosidade da superfície do alumínio.

4.7. ANÁLISE FMEA

O principal objetivo desta dissertação consistiu em identificar e compreender de que forma a química da superfície do alumínio influenciavam a interação com o revestimento de Greblon. Através da análise FMEA identificou-se um conjunto de falhas do processo que necessitavam de atenção imediata, tendo-se avaliado as causas e consequências de cada uma na adesão, homogeneidade e durabilidade do revestimento de PTFE, em função de um conjunto de condições a que o metal era sujeito. No anexo F encontram-se tabelados todos estes modos de falha, as suas consequências, e o resultado obtido de acordo com as ações tomadas. São ainda referidas algumas sugestões, quer para o processo de tratamento da superfície do alumínio (tabela F1), quer para o de aplicação e processamento do revestimento de Greblon (tabela F2).

No formulário da tabela F1 apresentam-se os principais subprocessos do pré-tratamento das placas de alumínio, destacando-se o desengorduramento e a decapagem. Entre os principais potenciais modos de falha do desengorduramento temos o facto das placas de alumínio apresentarem vestígios de óleos e gorduras no final desta etapa, situação que podia ser causada principalmente pela concentração do banho não estar a ser realizada corretamente ou por falta de manutenção dos aspersores do tanque de desengorduramento. Por este motivo houve uma ação corretiva no sentido de implementar um procedimento de controlo dos banhos de desengorduramento (anexo G), que garantisse que existia uma análise diária da concentração destes banhos. Além disso, estipulou-se que estes tanques deviam ser alvo de manutenção de 15 em 15 dias, para que não existisse qualquer problema com os aspersores ou outros problemas com o tanque.

Relativamente aos banhos de decapagem, o principal problema estava relacionado com as placas de alumínio, sendo que algumas apresentavam sujidade, e muitas das vezes a superfície estava significativamente “brilhante”. Tal como no caso anterior, optou-se por estabelecer um procedimento de controlo diário dos banhos, de forma a garantir que a concentração dos banhos de decapagem se encontrava dentro dos limites estabelecidos pelo



fornecedor do produto (Henkel). Foi implementado ainda um método de limpeza superficial dos banhos de decapagem, uma vez que existiam muitos vestígios de óleos e outros contaminantes nos banhos que ficavam fixados à superfície do alumínio, sendo consequentemente arrastados até ao final do processo.

No que diz respeito ao processo de revestimento das placas de alumínio, não foram tomadas quaisquer tipo de ações de forma a corrigir algumas das potenciais falhas que foram identificadas no formulário FMEA, deixando-se como sugestão alguns estudos que deveriam ser realizados, nomeadamente para determinar: a temperatura ótima dos fornos de cozimento, o tempo de cada subprocesso, a viscosidade ótima da tinta, ou ainda, a diferença de potencial mais adequado para a pintura eletrostática

Por todas as razões apresentadas e descritas nas tabelas FMEA do anexo F, sugerem-se a nível de trabalho futuro, algumas técnicas que permitam melhorar o processo de tratamento e pintura de antiaderentes. Seria importante realizar testes adicionais às placas revestidas que não sofrem qualquer tipo de tratamento prévio, nomeadamente através do teste de esfrega húmido, o qual permitiria obter uma melhor perceção da durabilidade da interação revestimento-substrato. Por sua vez, seria importante avaliar a energia livre de superfície e o trabalho de adesão das superfícies tratadas, com o principal objetivo de se obter uma melhor caracterização da molhabilidade.





5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No final desta dissertação é possível concluir que a concentração do banho de desengorduramento nunca pode ser inferior a 18,3 mL/L, uma vez que nestas condições as placas de alumínio tratadas ficam com alguns contaminantes na sua superfície, principalmente devido à excessiva quantidade de resíduos que são transportados do desengorduramento para as fases posteriores. Além disso, é praticamente impossível manter a concentração dos banhos de decapagem durante um dia de trabalho. Esta situação leva a um consumo exagerado de decapante, visto que se está diariamente a adicionar produto.

A análise da perda de massa das placas de alumínio revela ainda que a influência da concentração de decapante é muito mais significativa do que a de desengordurante. O aumento da concentração dos banhos de decapagem conduz ao aumento da perda de massa do substrato. Quando se trabalha a concentrações máximas de decapante (5% V/V), além de se remover os contaminantes de natureza inorgânica da superfície, existe um ataque severo ao próprio alumínio por parte do ácido. Esta situação é totalmente indesejável não só no que diz respeito à durabilidade e resistência do metal, mas também porque diminui o tempo de vida útil dos equipamentos utilizados no processo (corrosão). Para avaliar esta situação seria muito importante realizar alguns testes, nomeadamente para quantificar a rugosidade das placas submetidas a este tipo de condições.

As placas de alumínio tratadas com concentrações de desengordurante inferiores a 18,3 mL/L, quando são revestidas apresentam muitas vezes defeitos na película sólida formada, visíveis a olho nú. Para corrigir alguns destes defeitos, geralmente as placas revestidas voltam a ser pintadas, o que leva a que a espessura do revestimento de Greblon ultrapasse o máximo admitido.

Ao dividir-se a superfície do alumínio em quatro zonas distintas, verifica-se que na zona 2 e 4 existe uma pulverização de tinta completamente desnecessária por parte do operador. Esta situação leva a que a espessura média do revestimento ultrapasse o valor máximo permitido. Nas condições utilizadas para aplicação automática e processamento do revestimento de Greblon, observa-se que a espessura média da película obtida sobre a zona 3 da superfície do alumínio praticamente não é influenciada pela concentração dos banhos. A zona 1 de pintura é o local da superfície do alumínio onde a espessura média do revestimento de Greblon é consideravelmente inferior aos restantes casos, encontrando-se em muitos casos fora da gama estabelecida pelo fornecedor. O aumento significativo da espessura média do revestimento nestes casos, conduz mais uma vez a resultados negativos no teste da quadrícula, removendo-se a película de tinta do substrato com relativa facilidade.



Relativamente às placas que não foram submetidas a qualquer tipo de tratamento prévio, uma análise menos cuidada dos resultados obtidos poderia sugerir que o ideal seria revestir as placas nestas condições, uma vez que não existe nenhuma situação que aponte no sentido contrário desta teoria, sendo inclusivamente comprovada pelo teste da quadrícula. A determinação do ângulo de contacto destas placas mostra, no entanto, que o contacto entre o substrato e o revestimento de PTFE é fortemente afetado pela falta do tratamento prévio da superfície, podendo a durabilidade da interação substrato-revestimento ficar seriamente comprometida. Neste caso, seria também muito importante avaliar a rugosidade, a energia livre de superfície e a durabilidade destas superfícies, relacionando-as com a superfície das placas que foram submetidas a outras condições de tratamento.

Face aos resultados obtidos, será possível formular uma hipótese para resolver parte dos problemas identificados pela análise FMEA do processo de tratatamento das placas de alumínio. A evidência de que existem sérios problemas não só no que diz respeito ao contacto entre o alumínio e o revestimento de Greblon, mas também no que toca ao tempo de vida útil das fases posteriores ao desgorduramento, mostra que é preferível trabalhar com concentrações de desgordurante dentro da gama definida como máxima (26,0mL/L – 39,0mL/L). Por sua vez, tendo em conta que concentrações elevadas de decapante conduzem a um ataque severo ao próprio alumínio por parte do ácido, diminuindo a sua resistência e durabilidade, é legítimo considerar-se mais vantajoso trabalhar a concentrações mais reduzidas de decapante em cada tanque de decapagem, dentro da gama dos 2,5-3,5% (V/V). No anexo G são apresentadas os procedimentos de controlo implementados na empresa para controlo dos banhos de desgorduramento e decapagem, IF 10.58 e 10.59, respetivamente.

Dos resultados apresentados foi possível constatar que existiram algumas limitações que influenciaram o cumprimento de alguns objetivos, nomeadamente no que diz respeito à concentração dos banhos de decapagem. Muitas vezes pretendia-se que a concentração de decapante atingisse um determinado valor, porém quando se realizava o controlo dos banhos, após algumas horas de trabalho, esse valor era significativamente mais reduzido. Além disso, nos tanques de decapagem era frequente existir muita sujidade superficial, proveniente sobretudo das etapas anteriores. Esta situação era muitas vezes resolvida com a adição de água corrente para remover estes resíduos, o que levava à redução brusca da concentração de decapante, desperdiçando-se uma grande quantidade de produto. Como sugestão seria muito importante alterar alguns tempos de escoamento ou de passagem entre os vários tanques, principalmente entre os tanques de decapagem e os tanques de lavagem com água. Finalmente, algumas vezes verificou-se que os aspersores do tanque de desgorduramento não estavam corretamente direcionados e, inclusivé muitas vezes entupidos, dificultando assim a ação do



desengordurante, que não chegava a todas as placas da mesma forma. Os tanques muitas vezes apresentavam falta de manutenção, o que se traduzia numa perda significativa de produto por diversas formas.

Relativamente ao processo de aplicação da tinta, a sua principal limitação consistia na amplitude do pulverizador automático, que não conseguia alcançar todas as zonas da placa de alumínio da mesma forma. Além disso, verificou-se que se adicionava muito diluente à tinta, levando a que a sua viscosidade saísse da gama estabelecida pelo fornecedor da tinta.

Ao nível do processo de tratamento do alumínio utilizado pela empresa, seria importante avaliar o efeito da temperatura do banho de desengorduramento na qualidade final da lavagem. Tendo em conta que muitos resíduos são transportados para as fases posteriores ao desengorduramento, seria útil introduzir um filtro no sistema com o principal objetivo de reter muita da sujidade que está presente no sistema. Além disso, como já foi referido, seria fundamental encontrar um sistema que removesse os resíduos superficiais dos banhos de decapagem, sem prejuízo da sua concentração.

Finalmente, no processo de aplicação e processamento de antiaderentes seria fundamental definir as condições de pintura, nomeadamente pressões, amplitude do robot, velocidade da linha, entre outros, para os vários produtos finais. No que toca às placas que são repintadas, é fundamental encontrar alguma solução para o excesso de espessura de tinta que se verifica nestas placas. Como sugestão poderia polir-se as zonas defeituosas com o auxílio de uma lixa e, posteriormente, pulverizar apenas a zona em questão. Por sua vez, seria igualmente importante realizar um estudo que determinasse as condições ótimas de processamento dos revestimentos de Greblon (temperatura dos fornos e tempo de processo).





6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Vicente Gentil - “Corrosão”, Ed. Livros Técnicos Científicos Editora S.A., 3ª ed., Rio de Janeiro, 1996.
- [2] - Kayo Felipe Nunes Maia Queiroga, "Revestimentos," Curso Tecnológico de Petróleo e Gás, Universidade Potiguar – UNP, 2010.
- [3] - L. V. Ramanathan, "Corrosão e seu Controle," Ed. Hemus, São Paulo, 1982
- [4] - T. N. Bortak, "Guide to Protective Coatings: Inspection and Maintenance," United States Department of the Interior, 2002.
- [5] - N. G. SILVA, "Argamassa de Revestimento de Cimento, Cal e Areia Britada de Rocha Calcária," Pós-Graduação em Construção Civil – PPGCC/UFPR, Universidade Federal do Paraná, CURITIBA, 2006.
- [6] - Maria Cecília Oliveira and M. F. B. Maganha, "Guia técnico ambiental da indústria de cerâmicas branca e de revestimentos", S. CETESB – Biblioteca, Brasil, Ed., São Paulo, 2006.
- [7] - M. V. Costa, "Revestimentos de conversão," Apresentação de trabalho de pesquisa realizado pelo Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LAPEC), Universidade Federal do Rio grande do Sul, 2009.
- [8] - K. P. SOUZA, "A Influência do Ferro e do Óxido de Cério Sobre a Condutividade Elétrica e a Resistência à Corrosão do Alumínio Anodizado," Tese de Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2006.
- [9] - J. T. Ramos, "Obtenção e caracterização de revestimentos protetores à base de silanos e sua ação combinada com tintas na proteção ao aço-carbono," Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Universidade federal do Rio Grande do Sul, 2009.
- [10] - Fernanda M.B. Coutinho e Marcia C. Delpech, "Poliuretanos como Materiais de Revestimento de Superfície," *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 1999.
- [11] – S. Ebnesajjad, *Fluorinated Coatings and Finishes Handbook: The Definitive User's Guide and Databook*, Ed. William Andrew Publishing/Plastics Design Library, 2006.
- [12] – M. Kutz and S. Ebnesajjad, *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing and Materials*, Ed. Plastics Design Library, 2011.



- [13] – Jacqueline I. Kroschwitz, Arza Seidel, *Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology*, 2006.
- [14] – B. Hopp, N. Kresz, J. Kokavecz, T. Smausz, H. Schieferdecker, A. Döring, O. Marti, and Z. Bor, "Adhesive and morphological characteristics of surface chemically modified polytetrafluoroethylene films", *Applied Surface Science*, vol. 221, pp. 437-443, 2004.
- [15] – Mark, James E., *Polymer Data Handbook*, Oxford University Press, 2009.
- [16] – S. Ebnesajjad, *Fluoroplastics, Volume 1 - Non-Melt Processible Fluoroplastics*, 2000.
- [17] – F. Machado, E. L. Lima, and J. C. Pinto, "Uma Revisão Sobre os Processos de Polimerização em Suspensão," *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 17, pp. 166-179, 2007.
- [18] – M. D. Besteti, "Produção e caracterização de partículas casca-núcleo obtidas pela polimerização simultânea em suspensão e emulsão," Tese de Mestrado em Engenharia Química, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Outubro de 2009.
- [19] – P. C. Sayer, "Reações de Polimerização em Emulsão," Protocolo da disciplina de Laboratório para Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos.
- [20] – E. Leivo, T. Wilenius, T. Kinoshita, P. Vuoristo, and T. Mäntylä, "Properties of thermally sprayed fluoropolymer PVDF, ECTFE, PFA and FEP coatings," *Progress in Organic Coatings*, vol. 49, pp. 69-73, 2004.
- [21] – <http://www.productknowledge.com>. (acedido em Março de 2013).
- [22] – G. L. Witucki, "The evolution of silicon-based technology in coatings," *AETS Industry Specialist*, Dow Corning Corporation.
- [23] – R. D. Jaeger and M. Gleria, "Silicones in Industrial Applications" in *Inorganic Polymers*, Ed. Nova Science Publishers, New York, 2009.
- [24] – George E. Totten and D. Scott MacKenzie, *Handbook of Aluminum - Alloy Production and Materials Manufacturing* vol. 2, New York, 2003.
- [25] – Wagner I. A. D. Santos, "Caracterização da Resistência à Corrosão de Ligas de Alumínio após Tratamentos Alternativos à Cromatização, com e sem Revestimento Orgânico," Tese de Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear - Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2011.



- [26] – Fernando M. D. Reis, "Investigação do tratamento com moléculas auto-organizáveis para substituição da cromatização da liga AA5052H32 no preparo da superfície prévio a pintura," Dissertação de Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Materiais, autarquia associada à universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- [27] – Edward M. Petrie, *Handbook of Adhesives and Sealants*, Ed. McGraw-Hill Handbooks, 2000.
- [28] – Josué G. QUINI, "Adesivos estruturais uretânicos aplicados a combinações de compósitos, plásticos e metais," Tese de Doutorado em Tecnologia Nuclear – Materiais, Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, São Paulo, 2011.
- [29] – Carlos N. R. P. Mendes, "Contribuição ao desenvolvimento de projeto de carrocerias automotivas utilizando adesivo estrutural para junção de chapas metálicas," Tese de Mestrado em Engenharia Automotiva, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- [30] – M. P. COUTINHO, "Influência da morfologia da superfície na molhabilidade do titânio comercialmente puro," Tese de Mestrado em Ciências dos Materiais, Instituto militar de engenharia, Rio de Janeiro, 2007.
- [31] – E. Almeida, "Sector de tratamentos de superfície e revestimentos - uma panorâmica geral," *Ingenium*, vol. 45, pp. 61-70, 2000.
- [32] – G. Schubert, "Adhesion of Aluminium Foil to Coatings – Stick With it," Hydro Aluminium Deutschland GmbH R&D, Bonn, Germany, 2003.
- [33] – D. Dunlap, J. Parekhji, and A. J. Your, "Interfacial Adhesion," In Partial Fulfillment of the Course Requirements for MatE 210, Experimental Methods in Materials Engineering, 2002.
- [34] – J. S. D. SANTANA, "Avaliação tribológica dos polímeros NBR, PTFE e PTFE grafitado em contato com aço AISI 52100," Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.
- [35] – W. F. Leite, "Dissolução de Óxidos Formados a Altas Temperaturas nos Aços Elétricos Variando-se a Temperatura e Concentração da Solução Ácida na Decapagem," Tese de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2008.



- [36] – Anders Bornmyr and Björn Holmberg, “AvestaPolarit Welding – Pickling handbook – Handbook for the pickling and cleaning of stainless steel”; AvestaPolarit Welding AB, First Edition, Sweden, 1995.
- [37] – Núcleo de Desenvolvimento Técnico Mercadológico do Aço Inoxidável, "A importância da decapagem e passivação," *Aços Inoxidáveis, vol. Siderurgia Brasil — Edição 46, 10 de Setembro de 2008.*
- [38] – Dayanne D. d. Menezes, "Avaliação da resistência à corrosão de revestimentos de alumínio aplicados pelas técnicas de arco elétrico e chama convencional, em meio cloreto," Tese de Douturamento em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- [39] - S. D. d. Silva, "Pintura industrial com tintas líquidas," WEG Indústrias S.A. – Tintas, 2009.
- [40] - C. Gnecco, R. Mariano, and F. Fernandes, "Tratamento de superfície e pintura," Ed. Instituto brasileiro de siderurgia centro brasileiro da construção em aço, 2003.
- [41] - G. P. A. Turner, *Introduction to Paint Chemistry and Principles of Paint technology.* New York - USA: Chapman and Hall, Ltd, 1980.
- [42] - A. M. Kehrwald, K. E. Prodócimo, G. M. O. Barra, and C. P. Fernandes, “Comportamento hidrofóbico e oleofóbico de revestimento polimérico a base de fluorsilano,” Publicação no 10º Congresso Brasileiro de Polímeros, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – Departamento de Engenharia Mecânica, 2009.
- [43] - A. Pizzi, K. L. Mittal, “Handbook of Adhesive Technology”, Marcel Dekker, Inc., 2ª Ed., 2003
- [44] - F. D. C. MOTTA, "Caracterização da condutividade térmica, viscosidade dinâmica e ângulo de contato de nanofluidos baseados em partículas de alumina-gama em água," Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica., Universidade de São Paulo, 2012.
- [45] - L. A. D. d. Figueiredo, "Estudo da Estabilidade de Revestimentos com Polímeros Fluorados em Moldes de Espumas de Poliuretano," Tese de Mestrado em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.



- [46] - M. MARTINS, "Molhabilidade de apatita e sua influência na flotação," Tese de Doutorado em Engenharia Mineral, Universidade de São Paulo, 2009.
- [47] - Carlos Daniel Paiva Santos, "Proposta de Implementação de uma FMEA no Forno de Vapor Teka," Tese de Mestrado em Engenharia de Gestão Industrial, Departamento de Engenharia e Gestão Industrial, Universidade de Aveiro, 2008.
- [48] - Sónia Raposo Costa e Silva, Manuel Fonseca, and Jorge de Brito, "Metodologia FMEA e sua aplicação à Construção de edifícios," LNEC, QIC, 2006.
- [49] - Ronildo Xavier Dos Santos, "Aplicação do FMEA no Projeto de Moldes para Injeção de Materiais Termoplásticos", Trabalho de conclusão de curso em Tecnologia de Produção com ênfase em plástico, Centro Tecnológico da Zona Leste, Faculdade de Tecnologia da Zona Leste, São Paulo, 2009.
- [50] - Kallie Silva Ribeiro, "FMEA - Análise dos Modos de Falha e Efeitos Metodologia de Qualidade em Projetos de Sistemas de Informação", Tese de conclusão do curso de Técnico com ênfase em Gestão de Negócios, Centro Tecnológico da Zona Leste, Faculdade de Tecnologia Da Zona Leste, São Paulo, 2009.
- [51] - D. H. Stamatis, "Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution", American Society for Quality, 2^a Ed., 2003.
- [52] - José Carlos de Toledo and Daniel Capaldo Amaral, "FMEA - Análise do Tipo e Efeito de Falha," GEPEQ – Grupo de Estudos e Pesquisa em Qualidade, DEP - UFSCar.
- [53] - C. Moura, "Análise de modo e efeitos de falha potencial (FMEA)," vol. QS-9000, C. Corporation, F. M. Company, and G. M. Corporation, Eds., ed, 2009.





ANEXOS



ANEXO A

Tabela A.1 – Exemplo da tabela com o formulário FMEA de processo utilizado pela empresa na análise de todos os seus produtos/processos.

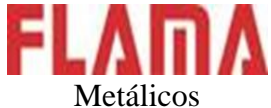
		FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS "FMEA"				PROJECT CODE	PROJECT MANAGER		START	FINISH			Page		
		Product												1/1	
		CLIENT													
"PROCESS FMEA"		MDFP				Prevention and Fail control									
STEP	ITEM FUNCTION	POTENCIAL FAILURE MODE	POTENCIAL EFFECT(s) OF FAILURE	POTENCIAL CAUSE(s)	S	PROCESS CONTROL	O	D	RPN	PRIORITY ACTION(s)	RESULT	EVALUATION			RPN
									S×O×D			S	O	D	S×O×D



Tabela A.2 – Exemplo de uma tabela com os vários critérios de avaliação da gravidade de um modo de falha para o FMEA de processo ^[53].

Effect	Rating	Criteria
No Effect	1	No Effect.
Very Slight Effect	2	Customer not annoyed. Very slight effect on vehicle or System performance.
Slight Effect	3	Customer slightly annoyed. Slight effect on vehicle or System performance.
Minor Effect	4	Customer experiences minor annoyance. Minor effect on vehicle or System performance.
Moderate Effect	5	Customer experiences some dissatisfaction. Moderate effect on vehicle or System performance.
Significant Effect	6	Customer experiences discomfort. Vehicle performance degraded, but operable and safe. Partial loss of System functions, but operable.
Major Effect	7	Customer dissatisfied. Vehicle performance severely affected but driveable and safe. System function impaired.
Extreme Effect	8	Customer very dissatisfied. Vehicle inoperable but safe. System inoperable.
Serious Effect	9	Potential hazardous effect. Able to stop vehicle without mishap – gradual failure. Compliance with Government regulation in jeopardy.
Hazardous Effect	10	Hazardous effect. Safety related - sudden failure. Non-compliance with Government regulation.

Tabela A.3 – Tabela com os vários critérios utilizados para avaliar a ocorrência de determinado modo de falha, para o FMEA de processo ^[52].

Probabilidade de Falha	Taxas de falha possíveis	Cpk	Índice de Ocorrência
Muito Alta: A falha é quase inevitável	≥ 1 em 2	$> 0,33$	10
	1 em 3	$\geq 0,33$	9
Alta: Geralmente associada a processos similares aos anteriores que apresentaram falhas frequente	1 em 8	$\geq 0,51$	8
	1 em 20	$\geq 0,67$	7
Moderada: Geralmente associada a processos similares aos anteriores que apresentaram talhas ocasionais, mas não em maiores proporções	1 em 80	$\geq 0,83$	6
	1 em 400	$\geq 1,00$	5
	1 em 2 000	$\geq 1,17$	4
Baixa: Associada a processos similares que apresentaram poucas falhas	1 em 15 000	$\geq 1,33$	3
Muito Baixa: Associada a processos quase idênticos que apresentaram apenas falhas isoladas	1 em 150 000	$\geq 1,50$	2
Improvável: Falha é improvável. Processos quase idênticos nunca apresentaram talhas	≤ 1 em 1 500 000	$\geq 1,67$	1



Tabela A.4 – Tabela com os vários critérios utilizados para avaliar a deteção de determinado modo de falha, para o FMEA de processo ^[50].

Deteção	Critério: Existência da probabilidade de um defeito ser detectado antes do próximo controle do processo ou no processo subsequente, ou antes que a peça ou o componente deixem o local de manufactura ou montagem.	Índice de deteção
Quase impossível	Não conhecido (s) controle (s) disponível (is) para detectar o modo de falha.	10
Muito remota	Probabilidade muito remota de que o (s) controle (s) actual (is) irá detectar o modo de falha.	9
Remota	Probabilidade remota de que o (s) controle (s) actual (is) irá detectar o modo de falha.	8
Muito baixa	Probabilidade muito baixa de que o (s) controle (s) actual (is) irá detectar o modo de falha.	7
Baixa	Probabilidade baixa de que o (s) controle (s) actual (is) irá detectar o modo de falha.	6
Moderada	Probabilidade moderada de que o (s) controle (s) actual (is) irá detectar o modo de falha.	5
Moderadamente alta	Probabilidade moderadamente alta de que o (s) controle (s) actual (is) irá detectar o modo de falha.	4
Alta	Probabilidade alta de que o (s) controle (s) actual (is) irá detectar o modo de falha.	3
Muito Alta	Probabilidade muito alta de que o (s) controle (s) actual (is) irá detectar o modo de falha.	2
Quase certamente	Controle (s) actual (is) quase certamente irá detectar o modo de falha. A confiança nos controles de deteção são conhecidos em processos similares.	1

**ANEXO B****Tabela B.1** – Tabela com os tempos envolvidos nas várias etapas do tratamento da superfície de placas de alumínio da empresa FLAMA S.A.

	Processo	Tempo (min)		Processo	Tempo (min)		Processo	Tempo (min)		Processo	Tempo (min)
Entrada no Deseng.	1	1,217	Retira placas da Lav.4	9	0,117	Entra placas na Lav.3	19	0,167	Retira placas da Lav.1	29	0,125
Chegada à Estufa	2	1,033	Arranca para o secador	10	0,083	Chegada à Dec.1	20	0,392	Arranca para Lav.2	30	0,092
Retira placas da Estufa	3	0,167	Entra placas no escorredor	11	0,167	Retira placas da Dec.1	21	0,142	Entra placas na Lav.2	31	0,150
Arranca para o final	37	0,100	Chegada à Lav.3	12	0,333	Arranca para Dec.2	22	0,083	Chegada ao Deseng.	32	0,450
Larga as placas, prontas a pintar	4	0,150	Retira as placas da Lav.3	13	0,200	Entra placas na Dec.2	23	0,167	Retira placas do Deseng.	33	0,217
Chegada ao Escorredor	5	0,400	Arranca para Lav.4	14	0,092	Chegada à Lav.2	24	0,407	Arranca para a Lav.1	34	0,217
Retira as placas do Escorredor	6	0,100	Entra placas na Lav.4	15	0,150	Retira placas da Lav.2	25	0,142	Entra placas na Lav.1	35	0,200
Arranca para a estufa	38	0,117	Chegada à Dec.2	16	0,400	Arranca para Dec.1	26	0,083	Final do Processo	36	0,975
Entrada das placas na Estufa	7	0,217	Retira placas da Dec.2	17	0,142	Entra placas na Dec.1	27	0,167	Tempo total do processo	-	10,040
Chegada à Lav.4	8	0,183	Arranca para Lav.3	18	0,083	Chegada à Lav.1	28	0,417			



ANEXO C



Excellence is our Passion

Novaspray AL1

Desengorduramento e desoxidação do alumínio e suas ligas em processos por aspersão

DESCRIÇÃO

NOVASPRAY AL1 é um produto líquido, de carácter ácido, que se utiliza no desengorduramento e desoxidação, em processos por aspersão, do alumínio e suas ligas.

A sua densidade típica é de 1,19.

APLICAÇÃO

NOVASPRAY AL1 foi especialmente estudado para desengordurar e desoxidar numa só operação, em processos por aspersão ou imersão, do alumínio e suas ligas.

NOVASPRAY AL 1 é ideal no pré-tratamento, por aspersão, do alumínio lacado como etapa prévia à formação de camadas cromatizadas ou fosfocromatizadas.

CONDIÇÕES OPERATÓRIAS

Concentração: 5 a 40 g/l
Temperatura: 50 °C
Pressão: 1 a 2 kg/cm²
Tempo de tratamento: 1 a 5 minutos

CONTROLO ANALÍTICO

Pipetar 10 ml de banho para um erlenmeyer de 250 ml.
Adicionar 3-5 gotas de fenolftaleína.
Titular com Hidróxido Sódio 0,1N

NOVASPRAY AL 1 (g/l) = V ml de NaOH 0,1 N x 3,5

MANIPULAÇÃO E ARMAZENAMENTO

NOVASPRAY AL 1 é produto ácido forte, devendo evitar-se o contacto com a pele e olhos.

Em caso de contacto com os olhos, lavar com água abundante durante várias minutos e procurar assistência médica de imediato.

Henkel Ibérica, s.a.
Sucursal Portugal
Estrada Nacional 10, km. 127
Apartado 237 - 2615 Alverca
Telefone: (351)(21) 9578156
Fax: (351)(21) 9578206

A presente informação está baseada na nossa experiência prática e ensaios de laboratório. Devido à grande diversidade de materiais existentes no mercado e às diferentes formas de aplicação que estão fora do nosso controlo, recordamos a necessidade de efectuar, em cada caso, ensaios práticos para garantir a idoneidade do produto em cada aplicação concreta. A nossa garantia estende-se apenas à qualidade dos lotes fornecidos, que são submetidos a grandes controlos analíticos, não podendo exigir-se outras responsabilidades.



ANEXO D

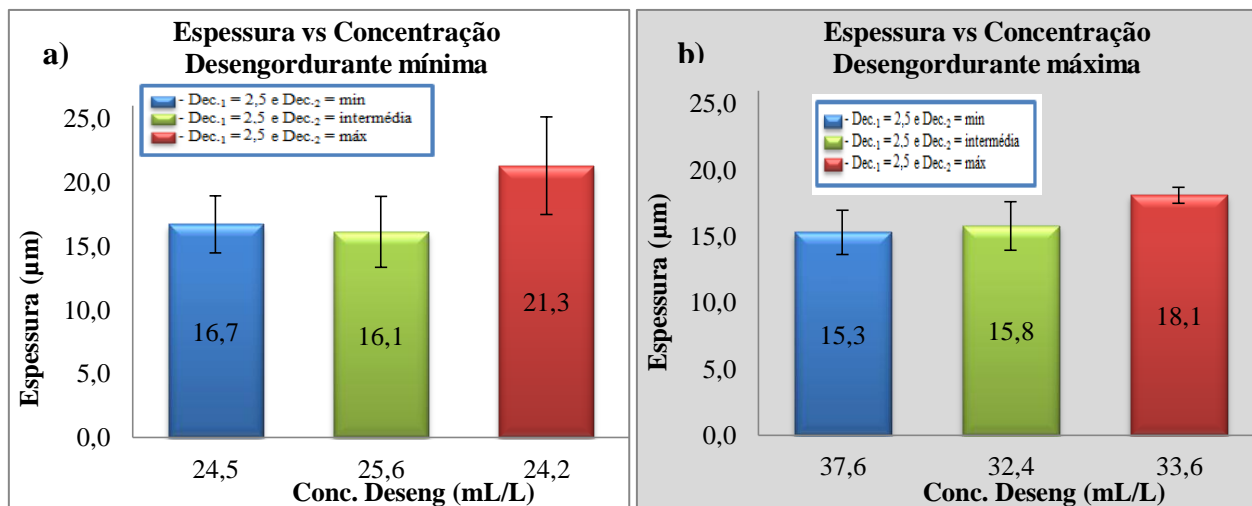


Fig. D1 – Evolução da espessura do revestimento em função da concentração de desengordurante: a) mínima e b) máxima, para os casos em que se fixou a primeira decapagem no valor mínimo (2,5%), variando a segunda decapagem. As barras de erro apresentadas correspondem aos desvios padrão obtidos na medição das espessuras, obtidas pelo Elcometer.

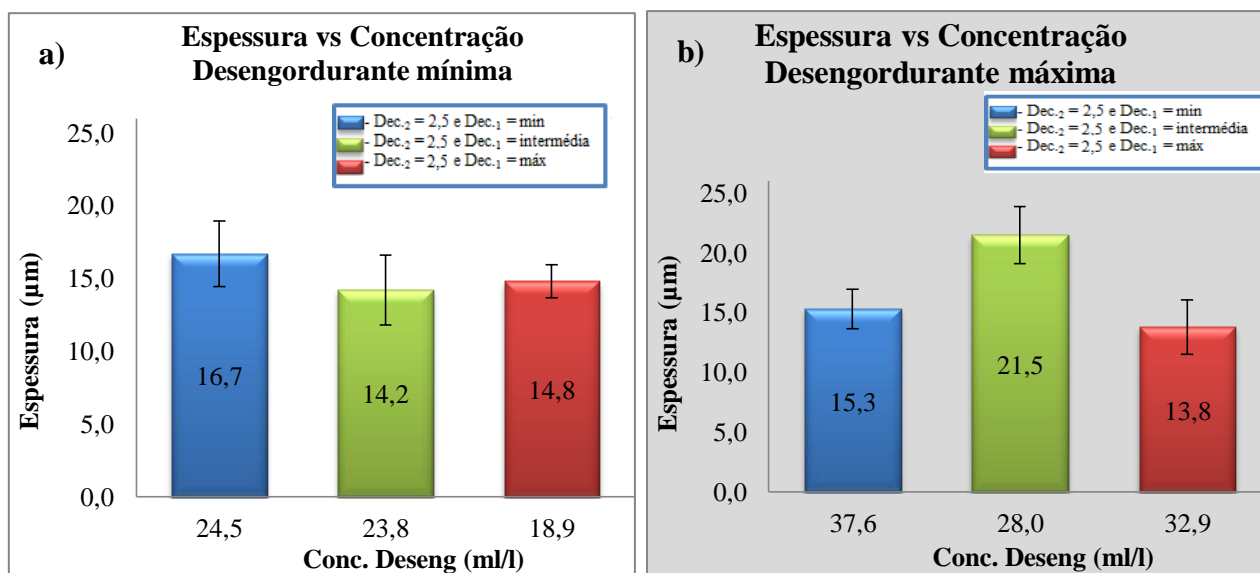


Fig. D2 – Evolução da espessura do revestimento em função da concentração de desengordurante: a) mínima e b) máxima, para os casos em que se fixou a segunda decapagem no valor mínimo (2,5%), variando a primeira decapagem. As barras de erro apresentadas correspondem aos desvios padrão obtidos na medição das espessuras, obtidas pelo Elcometer.

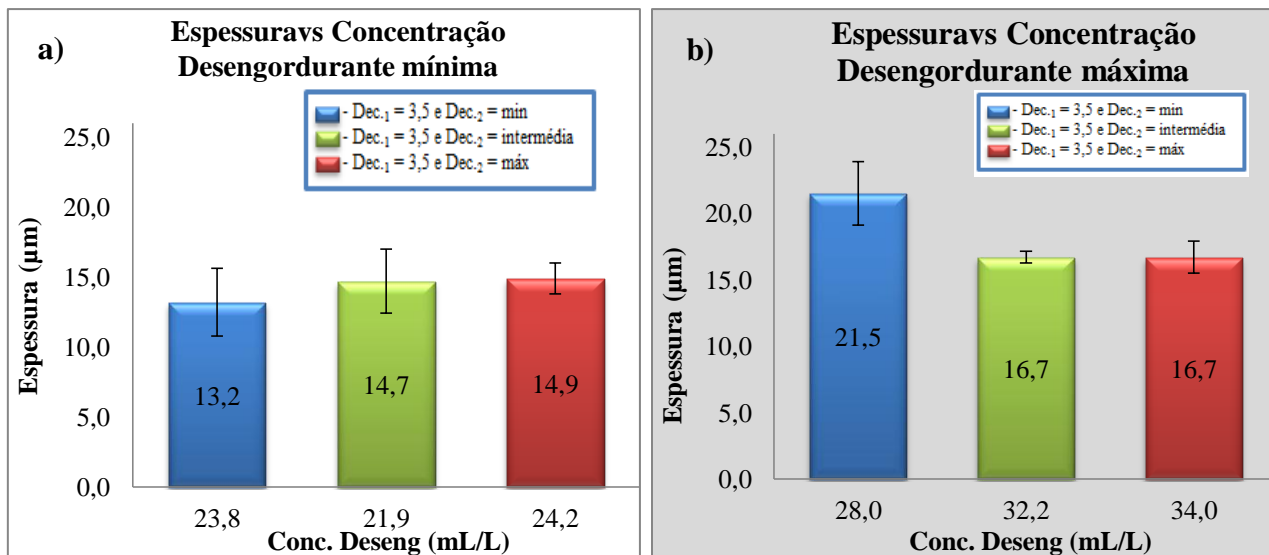


Fig. D3 – Evolução da espessura do revestimento em função da concentração de desengordurante: a) mínima e b) máxima, para os casos em que se fixou a primeira decapagem no valor intermédio (3,5%), variando a segunda decapagem. As barras de erro apresentadas correspondem aos desvios padrão obtidos na medição das espessuras, obtidas pelo Elcometer.

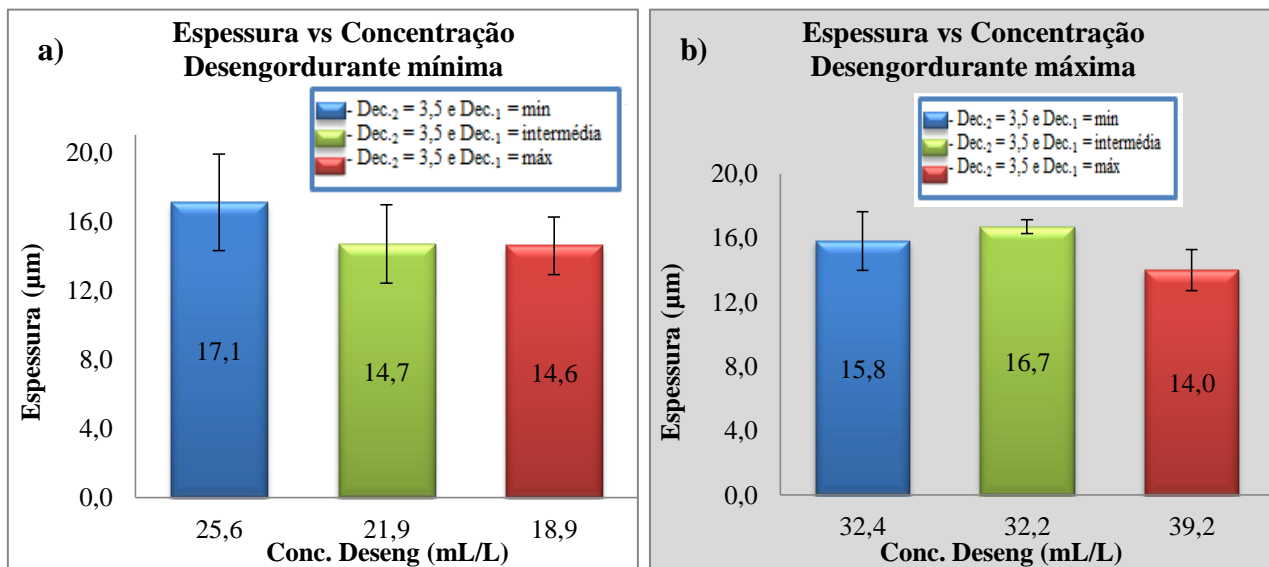


Fig. D4 – Evolução da espessura do revestimento em função da concentração de desengordurante: a) mínima e b) máxima, para os casos em que se fixou a segunda decapagem no valor intermédio (3,5%), variando a primeira decapagem. As barras de erro apresentadas correspondem aos desvios padrão obtidos na medição das espessuras, obtidas pelo Elcometer.

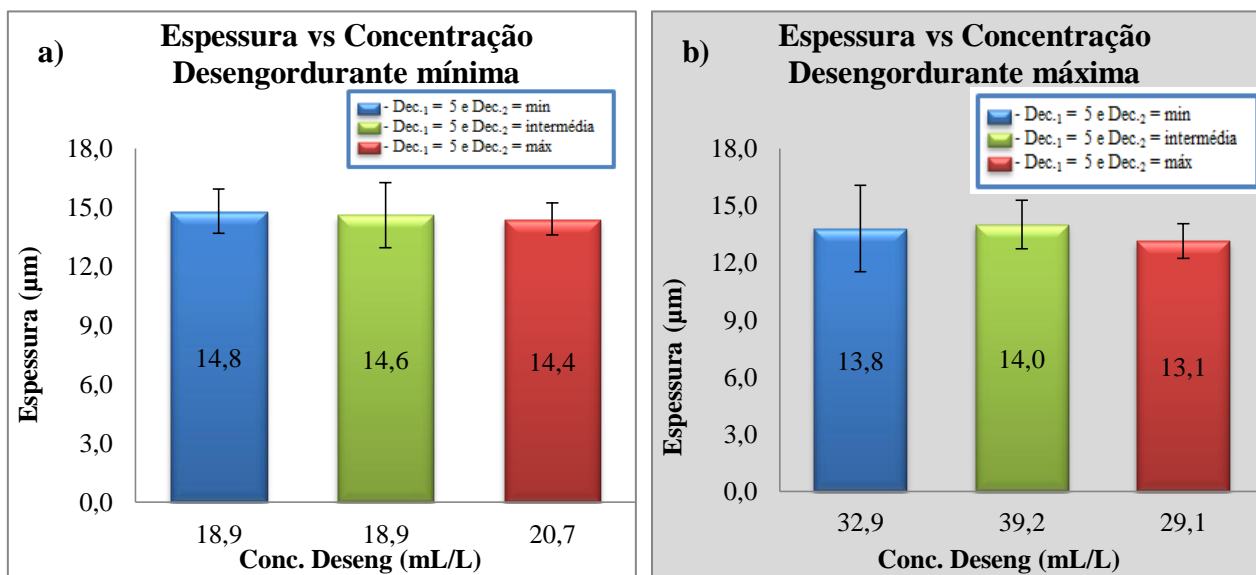


Fig. D5 – Evolução da espessura do revestimento em função da concentração de desengordurante: a) mínima e b) máxima, para os casos em que se fixou a primeira decapagem no valor máximo (5,0%), variando a segunda decapagem. As barras de erro apresentadas correspondem aos desvios padrão obtidos na medição das espessuras, obtidas pelo Elcometer.

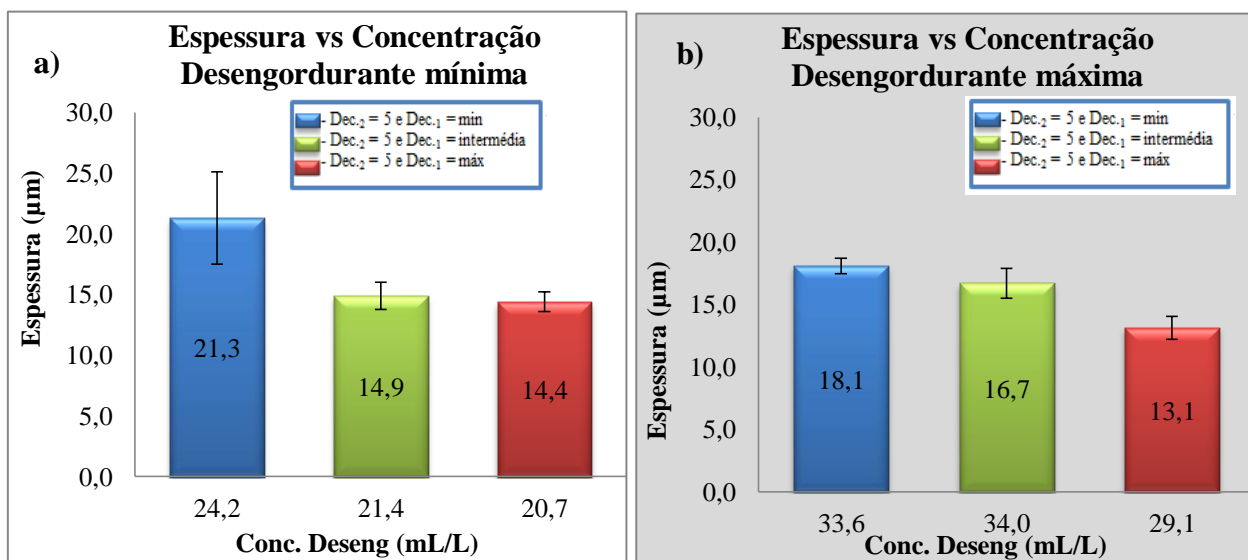


Fig. D6 – Evolução da espessura do revestimento em função da concentração de desengordurante: a) mínima e b) máxima, para os casos em que se fixou a segunda decapagem no valor máximo (5,0%), variando a primeira decapagem. As barras de erro apresentadas correspondem aos desvios padrão obtidos na medição das espessuras, obtidas pelo Elcometer.

**ANEXO E****Tabela E1** – Resultados obtidos pelo teste da quadrícula, para as placas de alumínio que não foram submetidas a qualquer tipo de tratamento prévio.

Ensaio	Teste quadrícula	Teste quadrícula – após água quente
	Pintura, normal	Pintura, normal
1	0	0
2	0	0
3	0	0


Tabela E2 – Concentrações de desengordurante (Novaspray AL 1) e decapante (N-Kleen Etch), utilizadas nos vários ensaios realizados.

Ensaio	Conc. Deseng (mL/L)	Conc. Dec. 1 % (V/V)	Conc. Dec. 2 % (V/V)								
1	37,6	2,3	1,9	12	16,1	2,5	2,5	23	20,7	5,3	5,2
2	36,5	2,9	2,4	13	14,2	2,3	2,5	24	21,4	3,4	4,2
3	35,5	1,7	2,1	14	14,0	2,5	2,5	25	18,9	4,4	3,4
4	33,8	2,2	2,6	15	14,0	2,1	1,9	26	18,9	4,2	2,8
5	27,8	3,4	3,0	16	24,5	2,1	2,1	27	29,1	4,2	4,4
6	28,0	3,1	2,9	17	25,0	2,2	2,1	28	34,0	3,3	4,6
7	23,8	3,3	2,9	18	24,3	2,7	3,6	29	32,2	4,0	4,0
8	22,1	3,3	3,2	19	25,6	2,6	3,6	30	33,6	2,9	4,3
9	21,9	3,2	3,1	20	24,2	2,6	4,9	31	32,4	2,9	3,6
10	17,9	2,2	2,2	21	32,9	4,4	2,3				
11	18,3	2,9	2,9	22	39,2	5,0	3,5				



ANEXO F

Tabela G1 – Formulário FMEA utilizado na análise do processo de tratamento das placas de alumínio utilizadas como suporte ao Greblon.

 Metálicos		FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS "FMEA"			PROJECT CODE	PROJECT MANAGER			START	FINISH			Pag		
		Product												1/1	
		CLIENT													
"PROCESS FMEA"		MDFP													
STEP	ITEM FUNCTION	POTENCIAL FAILURE MODE	POTENCIAL EFFECT(s) OF FAILURE	POTENCIAL CAUSE(s)	G	PROCESS CONTROL	O	D	RPN	PRIORITY ACTION(s)	RESULT	EVALUATION			RPN
									GxOxD			G	O	D	GxOxD
Desengorduramento	Remover óleos, gorduras ou outros contaminantes orgânicos	Placas com óleos e gorduras	- Baixa adesão da Tinta (PTFE) à superfície tratada (descascamento da tinta, "crateras" no revestimento final ou bolhas)	- Concentração fora da gama estabelecida pela ficha de segurança da Henkel	8	IF 10.58 e Controlo visual pelo operário	7	5	280	- Passar a analisar a concentração dos banhos do Desengorduramento diariamente;		8	1	1	8
										- Definir procedimento de controlo e adição de produto nos banhos (atualizar IF. 10.58);		8	1	1	8



										- No final da lavagem, avaliar a qualidade da mesma através de medições do ângulo de contato e da molhabilidade.					
				- O direcionamento dos aspersores não é o correto	7	Manutenção	4	6	168	- Direcionar os aspersores de maneira a que o banho chegue a todas as placas da mesma forma		7	2	2	28
				- Tempo insuficiente de Desengorduramento	8	IF 10.58 e manutenção	1	1	8						
				- Temperatura do banho fora da gama estabelecida pela ficha de segurança da Henkel	7	IF 10.58 e indicador da temperatura do sistema pelo operário	9	3	189	- Avaliar a eficiência da lavagem em função da Temperatura;					
										- Definir Temperatura ideal					
		- Placas com sujidade (preta)	Contaminação dos banhos posteriores (Decapagem e Lavagem)	- A concentração de Synergic cz não é suficiente	7	IF 10.58 e Controlo visual pelo operário	6	4	168	- Passar a analisar a concentração dos banhos do Desengorduramento diariamente (atualizar IF 10.58);		7	1	2	14



				- Equipamento sem manutenção (aspersores entupidos, abertura empanca -> perda de Solução)	6	Controlo pelo operário, Manutenção	6	5	180	- Efetuar manutenção no mínimo de 15 em 15 dias		6	2	2	24
										- Encontrar solução para a enorme perda de água à segunda-feira	Após banho novo deixou de acontecer -> produto em excesso ou falta de manutenção	6	1	1	6
				- 4º Tanque do Desengorduramento com muita sujidade acumulada que segue para os outros tanques	4	Controlo pelo operário	6	3	72	- Introduzir filtro na "cascata" com o objetivo de reter muita sujidade					
										- Retirar o lixo superficial do tanque 2x ao dia		4	2	2	16
Decapagem	Remover os óxidos, ativar o substrato para que a posterior deposição da tinta constitua uma camada	Placas com brilho	- Baixa adesão da tinta à superfície, o que conduzirá a um revestimento não-homogéneo	- Concentração fora da gama estabelecida pela ficha de segurança da Henkel	8	IF 10.59, Controlo pelo operário	7	9	504	- Passar a analisar a concentração dos banhos da Decapagem diariamente;		8	1	1	8



perfeitamente homogénea e aderente		(descascamento da tinta, "crateras" no revestimento final ou bolhas)						- Definir procedimento para controlo e adição de produto nos banhos (atualizar IF 10.59)		8	1	1	8				
								- Aumentar o tempo de escorrimento de um tanque para o outro (Lavagem para a Decapagem)									
								- Sempre que se duvidar da qualidade da Decapagem, calcular o grau de lavagem		8	1	1	8				
								- Tempo insuficiente de Decapagem	8	IF 10,59 e Manutenção	1	1	8				
								- Fraca agitação do banho (banho não homogéneo)	4		5	5	100	- Repensar o sistema de banho por imersão (talvez incluir um mecanismo que garanta a agitação do banho)			
	Placas com sujidade (preta)	Contaminação dos banhos posteriores (Lavagem) e	- Tanques com muita sujidade, vinda das etapas anteriores	6	Controlo pelo operário	5	3	90	- Remoção diária do lixo superficial dos banhos com um filtro ou aspirador de	6							



			imperfeições no revestimento final												
				- Cestos das placas completamente cheios de óleos e sujidade	5	Controlo pelo Operário	6	2	60	- Limpar os cestos antes da entrada no processo		5	2	1	10
Lavagem	Eliminação de resíduos das fases anteriores (Decapagem e Desengorduramento)	- Placas com sujidade (preta)	Contaminação dos banhos posteriores (Decapagem e Lavagem) e imperfeições no revestimento final	- Tanques cheios de sujidade	6	Controlo pelo Operário, manutenção	4	3	72	- Aumentar o tempo de escorrimento das fases anteriores às lavagens					
										- Verificação visual do lixo contido nos tanques 2x dia		6	2	2	24
										- Semanalmente as águas têm de ser renovadas, principalmente a do tanque nº3		6	1	1	6
										- Remover o lixo superficial várias vezes ao dia		6	1	1	6
				- As placas não ficam completamente imersas no banho	7	Controlo pelo operário, Manutenção	8	5	280	- O operário de hora em hora tem de verificar a altura da água no tanque		7	2	3	42





Estufa	Secagem das placas	- Placas húmidas	- Tinta não adere devido a superfície molhada ou placas frias	- Tempo de secagem insuficiente	6	Controlo pelo operário, Manutenção	1	1	6						
				- Temperatura da estufa insuficiente	6	Controlo pelo operário, Manutenção	2	2	24	- Definir T ideal					
										- Manutenção da estufa (fugas de calor, abertura da porta com problemas)					



Tabela G2 – Formulário FMEA utilizado na análise do processo aplicação do revestimento de Greblon sobre a superfície de alumínio.

<div>FLAMA</div> <div>Metálicos</div>		FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS "FMEA"				PROJECT CODE		PROJECT MANAGER		START	FINISH			Pag	
		Product													1/1
		CLIENT													
"PROCESS FMEA"		MDFP				Prevention and Fail control									
STEP	ITEM FUNCTION	POTENCIAL FAILURE MODE	POTENCIAL EFFECT(s) OF FAILURE	POTENCIAL CAUSE(s)	G	PROCESS CONTROL	O	D	RPN	PRIORITY ACTION(s)	RESULT	EVALUATION			RPN
									GxOxD			G	O	D	GxOxD
Pré-Aquecimento	Melhorar o contato entre a tinta e a placa	- Superfície do alumínio sem a temperatura recomendada (35 - 45 °C)	- Escorrimento da tinta na superfície do alumínio	- Equipamento de aquecimento sem manutenção (resistências desligadas)	5	Controlo pelo Operador, Manutenção	3	4	60	- Avaliar o funcionamento das resistências diariamente		5	1	1	5
				- Temperatura insuficiente no aquecimento	7	IF 10.07 e Manutenção	5	9	315	- Encontrar valor para T_ideal (35-45°C)					
				- Tempo insuficiente de aquecimento	5	IF 10.07, Operador e Manutenção	5	9	225	- Encontrar o tempo necessário para que a placa saia com a temperatura indicada (Velocidade da linha)					



Pintura - Robot	- Aplicação do revestimento (PTFE) na superfície do alumínio	- A tinta não chega da mesma forma a todas as zonas da placa	- Revestimento não-homogéneo	- Amplitude de pintura insuficiente (Robot)	7	Operador, Manutenção	9	1	63	- Definir a amplitude de acordo com as dimensões da placa utilizada	7	1	1	7
				- Parâmetros da pintura automática incorretos (Pressões e distância entre Placa-Robot)	5	Operador	5	6	150	- Encontrar os valores ótimos para os vários parâmetros da pintura automática				
				- Tinta mal formulada (Viscosidade) de acordo com a FT do Greblon	8	IF 10.07, Operador	8	8	512	- Estipular o tempo de agitação e viscosidade pretendida para a tinta				
				- Tempo de pintura inadequado	8	IF 10.07, Operador e Manutenção	1	1	8	- Definir a velocidade da linha (ótima)				
		- Grande quantidade de tinta desperdiçada pelo Robot	- Revestimento final com espessura fora da gama estabelecida pela Henkel; Escorrimento da tinta	- Parâmetros da pintura automática (Pressões e distância entre Placa-Robot) incorretos	5	Operador, Manutenção	5	6	150	- Encontrar os valores ótimos para os vários parâmetros da pintura automática				



				- Tinta mal formulada (excesso de tinta, pouco diluente)	8	IF 10.07, Operador	8	8	512	- Definir processo para a formulação da tinta					
				- Amplitude de pintura do Robot inadequada	7	Operador	9	1	63	- Definir a amplitude de acordo com as dimensões da placa utilizada		7	1	1	7
Pintura - Manual	- Aplicação manual do revestimento (Greblon) na superfície do alumínio	-Existe excesso de tinta aplicada (desperdício de tinta)	- Revestimento não-homogéneo (espessura fora da gama estabelecida pelo fabricante); Escorrimento; Casca de laranja	- Tinta mal formulada (Viscosidade) de acordo com a FT do Greblon	8	IF 10.07, Operador	8	8	512	- Estipular o tempo de agitação e viscosidade pretendida para a tinta					
				- Tempo de pintura muito elevado	6	Operador	5	5	150	- Definir o tempo adequado de pintura por placa					
				- Aplicação da tinta em locais onde não é necessário	8	Operador, Controlo qualidade	8	7	448	- Identificar os locais onde é necessário aplicar a tinta e onde não é necessário		8	2	3	48



				- Repintura de placas (aplicação do revestimento em zonas onde não era necessário; zonas defeituosas não preparadas devidamente)	8	Operador, Controlo qualidade	8	9	576	- Identificar as zonas que necessitam repintura, remover a camada de tinta nessa zona (lixagem), aplicar novamente a tinta apenas nessas zonas		8	1	2	16
				- O valor da diferença de potencial é inadequado	8	Operador, Controlo qualidade	9	9	648	- É urgente definir os valores a utilizar nas placas para o Brasil		8	3	2	48
Secagem da tinta	- Evaporação do solvente	- Bolhas, poros ou crateras no revestimento seco	- Diminuição da impermeabilidade e da proteção que o revestimento oferece, uma vez que não se encontra completamente sólido e compacto	- Temperatura de secagem fora da gama estabelecida pela FT do Greblon	8	IF 10.07, Manutenção e Operador	1	1	8	- Definir os valores ótimos da temperatura de secagem					
				- Tempo de secagem inadequado	8	IF 10.07, Operador e Manutenção	1	1	8	- Definir a velocidade da linha (ótima)					
Fornos	- Evaporação do solvente	- Bolhas, poros ou crateras no revestimento seco	- Diminuição da impermeabilidade e da proteção que o revestimento oferece, uma vez que não se encontra completamente sólido e compacto	- Temperatura dos fornos fora da gama estabelecida pela FT do Greblon	8	IF 10.07, Manutenção e Operador	1	1	8	- Definir os valores ótimos da temperatura de secagem					
				- Tempo de secagem inadequado	8	IF 10.07, Operador e Manutenção	1	1	8	- Definir a velocidade da linha (ótima)					



ANEXO G

FLAMA

METÁLICOS

INSTRUÇÃO FUNCIONAL

IF10.58 - CONTROLO DE BANHOS DESENGORDURAMENTO ALUMÍNIO ESTAMPADO

1. OBJECTIVO

Definir o procedimento de controlo do banho de desengorduramento do alumínio e suas ligas com Novaspray AL1.

2. RESPONSABILIDADES

O Quê?	Quando?	Quem?	Onde? (Registo)
Concentração Novaspray= 26 mL/L Concentração de Synergic cz = 3 mL/L	sempre que trabalha	Qualidade	I10.60
Correção dos banhos	Quando < 26 mL/L	Produção	
Temperatura 69-72°C	sempre que trabalha	Produção	
Pressão 1 a 2 kg/cm ²			
Volume do tanque = 1000L			
Tempo	1 a 5 minutos	Qualidade	

3. PROCEDIMENTO

3.1 Medição da concentração

3.1.1 Material necessário

Hidróxido de sódio 0,1N

Indicador fenolftaleína

Balão Erlenmeyer de 250 ml

Pipeta de 10 ml

Bureta

Jarro plástico

3.1.2 Recolha da amostra

Retirar uma amostra de banho do tanque respetivo.

3.1.3 Titulação

- Em laboratório, retirar com pipeta 10 ml de banho e colocar num erlenmeyer de 250 mL

- Adicionar 4 a 6 gotas de fenolftaleína

- Agitar até homogeneizar

- Com bureta titular a solução com hidróxido de sódio até obter a mudança de cor (rosa)

- A concentração em mL/L = 3,5 x Valor lido

3.2 Quantidade produtos para Banho Novo

NOVASPRAY AL1 = 26 L

Synergic CZ = 3,0 L

3.3 Quantidade produtos para Correção

Valor lido	NOVASPRAY AL1		Synergic CZ
	concent. (mL/L)	prod. Acrescentar (L)	prod. Acrescentar (L)
7,5	26,0	0,0	0,0
7,3	25,6	0,4	0,1
7,1	24,9	1,2	0,1
6,9	24,2	1,9	0,2
6,7	23,5	2,6	0,3
6,5	22,8	3,3	0,4
6,3	22,1	4,0	0,5
6,1	21,4	4,7	0,5
5,9	20,7	5,4	0,6
5,7	20,0	6,1	0,7
5,5	19,3	6,8	0,8
5,3	Fazer banho novo		

NOTA: para valores $\leq 7,5$ o controlo e registo após adição é obrigatório. Fazer após 1 hora (da adição).

3.4 - Manutenção

A produção e/ou a Qualidade devem avaliar em cada dia de trabalho o desengorduramento realizado, assim como a quantidade de produto acrescentada.

Qualquer anomalia deve ser comunicada ao Chefe de Produção e/ou à Qualidade.



METÁLICOS

INSTRUÇÃO FUNCIONAL
IF10.59 - CONTROLO DE BANHOS DECAPAGEM ALUMÍNIO ESTAMPADO**1. OBJECTIVO**

Definir o procedimento de controlo do banho de decapagem do alumínio e suas ligas com N-Kleen Etch..

2. RESPONSABILIDADES

O Quê?	Quando?	Quem?	Onde? (Registo)
Concentração* = 2,5% -5% (V/V) * em cada tanque de decapagem	sempre que trabalha	Qualidade	I10.61
Correção dos banhos	Quando concentração < 8%	Produção	
Temperatura ambiente	sempre que trabalha	Produção	
Volume do tanque = 450L			
Tempo	2 a 10 minutos	Qualidade	

3. PROCEDIMENTO**3.1 Medição da concentração****3.1.1 Material necessário**

Hidróxido de sódio 1N

Pipeta de 10 ml

Azul de bromofenol

Bureta

Tubo de ensaio erlenmeyer de 250 ml

Jarro plástico

3.1.2 Recolha da amostra

Retirar uma amostra de banho do tanque respetivo.

3.1.3 Titulação

- Retirar com pipeta 10 ml de banho e colocar em tubo erlenmeyer de 250 ml
- Adicionar 3 a 4 gotas de azul de bromofenol
- Agitar até homogeneizar
- Com bureta titular a solução com hidróxido de sódio até obter a mudança de cor (azulada)
- A concentração em % (V/V) = 2,1 x Valor lido

3.2 Quantidade produtos para Banho Novo

N-Kleen Etch = 16 litros

3.3 Quantidade produtos para Correção

Valor lido (mL)	N-Kleen Etch (L)	% (V/V)
1,7	0,0	3,5
1,6	0,6	3,4
1,5	1,6	3,2
1,4	2,5	2,9
1,3	3,5	2,7
1,2	4,4	2,5
1,1	Fazer banho novo	

NOTA: para valores ≤1,7 o controlo e registo após adição **é obrigatório**. Fazer após 1 hora (da adição).

3.4 - Manutenção

A produção e/ou a Qualidade devem avaliar em cada dia de trabalho o desengorduramento realizado, assim como a quantidade de produto acrescentada.

Qualquer anomalia deve ser comunicada ao Chefe de Produção e/ou à Qualidade.